



**HAL**  
open science

# Caractérisation statistique des événements de submersion sur le Côte Basque

Florian Arnoux

► **To cite this version:**

Florian Arnoux. Caractérisation statistique des événements de submersion sur le Côte Basque. Variables complexes [math.CV]. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2019. Français. NNT : 2019PAUU3032 . tel-02523790

**HAL Id: tel-02523790**

**<https://theses.hal.science/tel-02523790>**

Submitted on 29 Mar 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ**  
DE PAU ET DES  
PAYS DE L'ADOUR



**PYRENEES  
ATLANTIQUES**  
LE DEPARTEMENT

École doctorale n° 211 : Sciences Exactes et leurs Applications

## **Doctorat Sciences de l'Univers**

présenté et soutenu par  
**Florian ARNOUX**

pour obtenir le grade de docteur délivré par l'

### **Université de Pau et des Pays de l'Adour**

**Spécialité "Géosciences"**

## **Caractérisation statistique des événements de submersion sur la côte Basque**

### **Jury**

<b>M. Bruno CASTELLE,</b>	Professeur, UMR EPOC, Université de Bordeaux	Rapporteur
<b>M. Damien SOUS,</b>	Maître de conférences HDR, Inst. Méditerranéen d'Océanologie	Rapporteur
<b>Mme Noëlle BRU,</b>	Maître de conférences, LMAP, UPPA	Examineur
<b>M. Thomas BULTEAU,</b>	Ingénieur, BRGM	Examineur
<b>Mme Nadia SÉNÉCHAL,</b>	Professeur, UMR EPOC, Université de Bordeaux	Examineur
<b>M. Stéphane ABADIE,</b>	Professeur, SIAME, UPPA	Directeur de thèse
<b>M. Ivan KOJADINOVIC,</b>	Professeur, LMAP, UPPA	Directeur de thèse

**Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)**

Laboratoire des Mathématiques et leurs Applications (LMAP)

Laboratoire des Sciences pour l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique (SIAME)

---

# Résumé

Dans un contexte de changement climatique et de forte croissance démographique sur les littoraux, les tempêtes et événements de submersion ont un potentiel destructeur de plus en plus important. Ce travail de thèse a cherché à explorer les liens entre les conditions océaniques lors de tempêtes et la présence ou absence de dégâts littoraux. Le Pays Basque français a été choisi comme site d'étude et l'analyse a concerné la période 1949-2015.

Une première contribution de ce travail a été d'identifier les *variables d'aléa* les plus susceptibles de caractériser l'intensité d'un événement de submersion. Un recensement complet des sources de données existantes ainsi qu'un travail de réanalyse nous ont permis d'obtenir des séries temporelles de variables d'aléa fiables, complètes et couvrant la période 1949-2015.

Dans un deuxième temps, une recherche historique documentaire a été effectuée pour répertorier les événements de submersion ayant occasionné des dégâts sur la côte Basque. Ce travail d'investigation s'est principalement focalisé sur deux lieux : la Grande Plage de Biarritz et la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz. Il a donné lieu à l'établissement d'un catalogue de 30 tempêtes qui sont décrites par des indices de dégâts et de submersion.

Le dernier axe de travail a été de lier les séries temporelles de variables d'aléa avec les données historiques concernant les dégâts. Cela a permis de créer une fonction de dommages utilisant les valeurs des variables d'aléa pour prédire la présence ou l'absence de dégâts liés à la submersion. Cette fonction de dommages a ensuite, entre autres, permis de montrer le caractère exceptionnel des événements de l'hiver 2013-2014 sur la période 1949-2015 en calculant notamment des périodes de retour.

**Mots clés :** submersion, dégâts, hiver 2013-2014, recherche historique, variables d'aléa, valeurs extrêmes, classification de tempêtes.

---

## Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à Bruno Castelle et Damien Sous pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit de thèse. J'ajoute Noëlle Bru, Thomas Bulteau et Nadia Sénéchal que je remercie de me faire l'honneur de compléter mon jury de thèse. Merci également à Xavier Bertin, qui en compagnie de Thomas Bulteau, a formé mon comité de thèse et qui m'ont grandement aidé à évoluer au sein de ce projet.

Je souhaite également remercier mes deux directeurs de thèse Stéphane Abadie et Ivan Kojadinovic qui, au cours de années, m'ont donné une excellente image du travail de chercheur, m'ont beaucoup appris de leurs domaines respectifs et ont su me pousser et me guider pour finaliser ce manuscrit et faire avancer le projet. Merci également à Marion Beauvivre et Estelle Egurolla pour leurs travaux de stages de Master qui ont fortement contribué au projet.

Un grand merci à mes amis Bastien, Benoit, Louis, Jean-Romain, Manon et Kevin pour la relecture de mon manuscrit et leurs critiques pertinentes et constructives qui ont aidé à l'écriture de celui-ci. Merci beaucoup aussi à tous les gens qui m'ont aidé à me loger lors de mes séjours à Anglet : tout d'abord ma mère Catherine et mon beau-père Christian ainsi que ma tante Claudine et sa famille Fabrice, Alice et Antoine pour les appartements hendayais, sans oublier mes quelques amis sur la côte Basque Clément, Kevin, Thomas, Ariane, Amélie, Antton... qui m'ont toujours généreusement accueilli! Une petite pensée aussi pour mes sœurs Marie (et son compagnon Guillaume) et Ariane pour leurs coups de main sur ce document et leur soutien permanent.

Enfin merci à toutes les personnes au sein de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour qui ont permis à cette thèse de se conclure malgré une année 2018 difficile.

Merci à vous tous!

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>ii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Submersion du littoral et dommages associés . . . . .	1
1.2 Hiver 2013-2014 . . . . .	5
1.3 Études existantes . . . . .	5
1.4 Objectifs et contributions . . . . .	7
<b>2 Variables permettant de décrire l'aléa de submersion</b>	<b>9</b>
2.1 Notion de vague . . . . .	10
2.2 Le niveau d'eau . . . . .	12
2.3 Définition d'un état de mer . . . . .	14
2.4 Variables d'aléa liées à la submersion . . . . .	17
<b>3 Séries temporelles d'états de mer et de niveaux d'eau</b>	<b>23</b>
3.1 Séries temporelles d'états de mer liées aux vagues . . . . .	24
3.2 Séries temporelles de niveaux d'eau . . . . .	29
3.3 Format des données . . . . .	33
<b>4 Validation et correction des séries temporelles d'états de mer et de niveaux d'eau</b>	<b>35</b>
4.1 Outils statistiques pour la comparaison de séries temporelles . . . . .	36
4.2 Comparaisons des simulations avec des observations <i>in situ</i> . . . . .	39
4.3 Séries temporelles corrigées en distribution . . . . .	47
<b>5 Évènements de submersions et dégâts pour la côte basque</b>	<b>51</b>
5.1 Le Pays basque français . . . . .	52
5.2 Recherche documentaire sur les évènements de submersion . . . . .	53
5.3 Catalogue des évènements identifiés . . . . .	61
<b>6 Création d'une fonction de dommages pour la côte basque</b>	<b>67</b>
6.1 Caractérisation statistique des tempêtes à dommages . . . . .	68
6.2 Application au calcul de périodes de retour d'évènements de submersion . . . . .	85

<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>95</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>97</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>103</b>
<b>Annexes</b>	<b>105</b>
<b>Références</b>	<b>136</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### Sommaire

---

<b>1.1 Submersion du littoral et dommages associés</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1.2 Hiver 2013-2014</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1.3 Études existantes</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1.4 Objectifs et contributions</b> . . . . .	<b>7</b>

---

Au travers d'importants changements sociétaux depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, la France est devenue un pays avec un littoral attractif, plébiscité pour sa beauté et son dynamisme. Cependant, l'océan représente aussi une source de problèmes non négligeables. En effet, les importants développements côtiers que sont le tourisme, l'industrie portuaire et l'immobilier ont conduit à élaborer d'importants plans de gestion du littoral. Les plages et côtes sont quotidiennement soumises aux vagues et aux marées, des phénomènes naturels qui sont connus mais potentiellement dangereux, notamment durant les périodes dites de tempêtes. Ce chapitre introductif va tout d'abord chercher à définir le terme de tempête dans un cadre littoral. Parallèlement, la notion de risque et de vulnérabilité sera étudiée en lien avec le cadre géographique choisi ici : le Pays basque français. Puis, nous discuterons des événements de 2013-2014 qui ont impacté significativement les littoraux. Enfin, une rétrospective des travaux existants sera faite de manière à introduire les axes de réflexion de l'ensemble de ce travail de thèse.

### 1.1 Submersion du littoral et dommages associés

Une tempête est un événement météorologique violent. Au cours de ce type de phénomène, les conditions environnementales, comme le vent ou les précipitations atteignent des valeurs inhabituelles, voire extrêmes. Une tempête peut affecter une zone de plusieurs centaines de kilomètres et avoir une durée supérieure à une journée. Dans la conscience collective, il s'agit d'événements capables de provoquer des dommages humains et matériels, qui sont souvent associés à un vocabulaire décrivant le danger : "effroyable", "gronder", "mugir", "faire rage", "s'abriter", ... Les tem-

pêtes peuvent concerner toutes les zones climatiques et être caractérisées par tous les types de précipitations (pluie, neige, grêle). La stricte définition liée à la météorologie stipule qu'un événement peut être qualifié de tempête quand le vent atteint force 10 sur l'échelle de Beaufort [57], ce qui correspond à un vent moyen d'environ  $90 \text{ km.h}^{-1}$ . On commence à trouver des descriptions précises de tempêtes déjà au Moyen-Age [9] et l'histoire récente permet d'appréhender le caractère parfois catastrophique que peuvent revêtir certains de ces événements, notamment lorsqu'ils impactent des pays vulnérables.

Dans le cas de l'étude menée dans ce travail de thèse, l'intérêt a essentiellement porté sur la submersion. En effet, une part significative des dégâts ayant lieu en zone littorale est provoquée par les inondations générées par la mer. Comme pour les tempêtes, la submersion est associée au danger de par son côté inhabituel et extrême. En effet, une submersion intervient quand une quantité d'eau de mer importante se retrouve à un endroit habituellement sec et abrité. De manière générale, un événement de submersion marine peut être provoqué par des conditions de mer (vagues, marées, ...) fortes et dont l'intensité dépend du lieu considéré. La submersion se rencontre souvent quand les paramètres météorologiques sont extrêmes et que le terme de tempête peut être employé, mais pas toujours. En effet, la mer est soumise aux variations provoquées par les conditions météorologiques (vent, pression, ...) à un instant donné. Dans le présent document, parmi l'ensemble des tempêtes, seuls les événements ayant conduit à une submersion seront considérés, l'une des problématiques sera de distinguer les tempêtes au cours desquelles il y a eu submersion et celles où aucune submersion n'a pu être observée.

La problématique des dégâts à la côte pose une première interrogation : comment définir la vulnérabilité des territoires? Pour cela, il est important de regarder l'évolution des espaces littoraux pour comprendre pourquoi certains deviennent des zones exposées aux aléas météorologiques. Selon l'IPCC (*International Panel on Climate Change*) dans son rapport de 2014 [64], deux axes semblent émerger pour expliquer cette situation. Tout d'abord, un aléa comme la submersion a des conséquences s'il se déroule dans un environnement à risques. Le risque existe si le territoire considéré est vulnérable à un aléa, si cet aléa a une probabilité non nulle de se produire et enfin si des enjeux humains et matériel existent au sein de ce territoire. Concrètement, dans cette étude, les territoires considérés seront des littoraux exposés aux submersions où la présence de personnes, de biens et d'équipements est suffisamment importante pour nécessiter un suivi. En France, depuis la fin du XIXème siècle et la révolution industrielle, la baisse de la mortalité a entraîné une croissance de la démographie. Cette augmentation a eu pour conséquence une densification des espaces urbains. Une autre conséquence de la révolution industrielle est le développement des échanges internationaux et donc des grands ports. Enfin, la naissance d'une société de loisirs avec notamment le tourisme balnéaire a impacté le développement des zones côtières.

Aujourd'hui, les communes françaises littorales représentent 4% du territoire, alors qu'elles accueillent 10% de la population [40]. Ces phénomènes ne connaissant pas de ralentissement, l'urbanisation du littoral et sa densification ont conduit à l'augmentation du nombre d'enjeux humains et matériel présents. Par exemple,

aujourd'hui, sur la côte basque, les villes sont plus grandes, les constructions sont plus proches du trait de côte (ligne représentant l'intersection entre la mer et la terre), ce qui entraîne une plus grande densité de population. Cela est à opposer au fait qu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle la présence d'enjeux humains et matériel était sensiblement plus modeste. Ce processus n'est pas propre à la France puisque partout dans le monde les espaces littoraux constituent des espaces privilégiés d'extension et de peuplement [13]. La proportion d'espaces littoraux soumis aux aléas liés à l'océan est donc de plus en plus importante. L'humain de par son développement et sa démographie a donc augmenté la vulnérabilité de son territoire vis à vis des évènements de submersion.

Le second axe de réflexion face à l'augmentation des risques est lié à la probable augmentation du nombre d'aléas et de leur dangerosité. En effet, une problématique souvent évoquée est l'augmentation de la température provoquée par le changement climatique, ce qui induit une hausse du niveau de la mer via la dilatation des océans et, dans une moindre mesure, par la fonte des glaciers [38]. Étant donné le cadre temporel trop court considéré dans cette étude, l'éventuelle augmentation du nombre d'occurrences de tempêtes et l'impact anthropologique du changement climatique ne seront pas discutés. En revanche, la hausse du niveau global de la mer, suite au changement climatique, a pour conséquence directe d'augmenter la vulnérabilité des littoraux en rajoutant une certaine hauteur d'eau qui augmente avec le temps en particulier pendant les évènements de submersion. Une autre conséquence potentielle du changement climatique est une augmentation des vitesses des vents importants, ce qui pourrait augmenter l'énergie disponible au cours des tempêtes.

Toutes ces informations conduisent à la conclusion que le territoire littoral français est plus exposé aux évènements de submersion et donc aux conséquences que ceux-ci peuvent avoir d'un point de vue économique et politique. Il est normal pour les décideurs des zones littorales de se poser des questions sur les dégâts que peut provoquer un évènement de submersion et de réfléchir aux stratégies à adopter pour la prévention et les réparations. Dans un tel contexte, il a été décidé de mener cette étude en considérant le Pays basque français comme zone test afin de comprendre les dégâts liés à la submersion. La figure 1.1 montre la carte de situation du Pays basque français avec notamment ses huit communes littorales : Anglet, Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz, Ciboure, Urrugne et Hendaye. Le profil naturel de ce littoral est plutôt rocheux et escarpé, avec des plages de tailles moyennes séparées par des caps et des falaises peu élevées. Les falaises rocheuses alternent avec des baies et des plages sableuses sur une longueur de 40 kilomètres. L'urbanisation de cette côte est très dense et très proche des plages.

Le Pays basque français bénéficie d'une image globalement très positive pour sa qualité de vie et ses espaces naturels préservés. Cette attractivité connue est responsable d'une croissance démographique importante (depuis 1982, 15 % de la hausse de la population provient des flux migratoires [40]). Malgré un affaiblissement de cette augmentation, l'évolution reste positive. De plus, comme le montre le plan de la figure 1.2, les littoraux les plus urbanisés de l'ancienne région Aquitaine sont ceux du Pays basque avec une densité de population plus importante que celles des



FIGURE 1.1 – Carte de situation du Pays basque français.

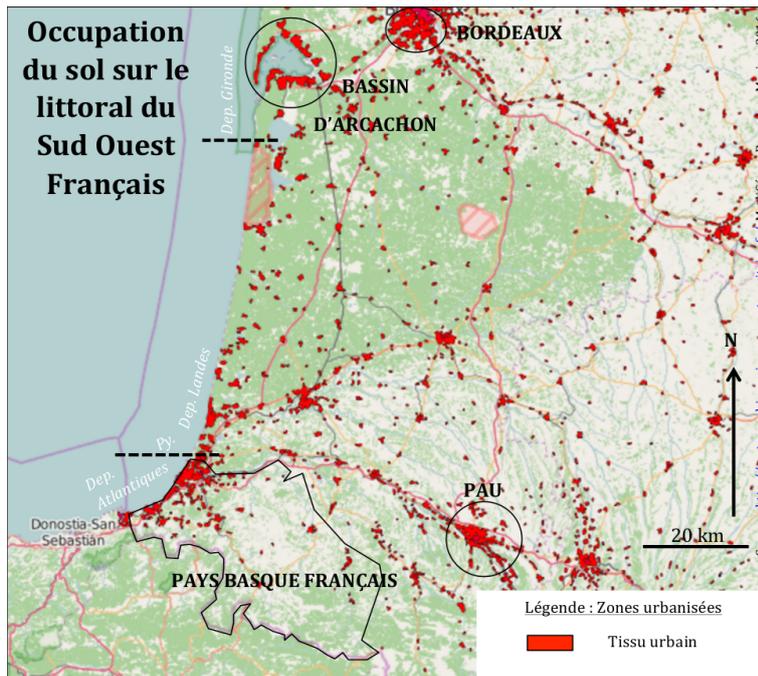


FIGURE 1.2 – Occupation des sols au niveau du sud-ouest français [44].

côtes landaises et du Bassin d’Arcachon. Pour réaliser une étude sur une zone de l’ampleur du Pays basque, il est difficile de se pencher de manière exhaustive sur l’intégralité du littoral. Vue son importance (qui sera précisée au chapitre 5), la ville de Biarritz a été utilisée comme ville pilote pour étudier les dégâts liés à la submersion.

## 1.2 Hiver 2013-2014

L'hiver 2013-2014 a connu une succession de tempêtes ayant très fortement affecté les littoraux français, notamment le sud-ouest et la côte basque. Les tempêtes les plus importantes se sont déroulées autour de la date de Noël (tempête "Dirk") puis au cours des dix premiers jours du mois de janvier (tempête "Hercules") et enfin le 3 mars (tempête "Christine") [10]. Les journalistes ont également relaté des records de pluviométrie dans plusieurs villes du sud-ouest avec des valeurs atteignant deux, voire trois fois, les normales de saison (par exemple, à Bordeaux, 184 mm d'eau contre 87 mm, à Pau, 235 mm contre 94 mm, à Mont-de-Marsan, 198 mm contre 78 mm, à Anglet, 269 mm contre 129 mm, à Dax, 306 mm contre 106 mm). Les vents ont atteint les  $110 \text{ km.h}^{-1}$ . Au total, selon les départements, de 10 à 18 jours de vigilance météo ont été déclarés entre le 19 décembre et le 6 février. De nombreuses crues, inondations et l'action des vagues énergétiques ont redessiné la région au cours de cet hiver. Le bilan humain et financier a été très important. Par exemple, le département de la Gironde a rapidement parlé de 6.6 millions d'euros de dégâts uniquement pour les communes littorales [10].

Dans son rapport du printemps 2014 [12], le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) a dressé un bilan du déroulement et de l'impact de ces tempêtes pendant cet hiver particulier. Département par département puis commune par commune, les experts du BRGM et de l'ONF (Office National des Forêts) ont analysé de la manière la plus exhaustive possible les dégradations observées. Les deux périodes qualifiées de plus forte intensité sont celle du 23 au 27 décembre 2013 (tempête "Dirk") et celle du 3 au 7 janvier 2014 (dépression "Hercules"). Les dommages sur la côte sableuse de toute l'Aquitaine ont pris la forme de fortes érosions qui ont provoqué un gros recul du trait de côte (de 10 à 15 mètres par endroit). Sur les parties rocheuses, de nombreux dégâts ont été relevés sur les enrochements, les zones d'accès aux plages (escaliers, parapets, ...) et les bâtiments proches de l'eau. Ces événements, dans leur ensemble, ont conduit à des travaux de réhabilitation puis d'entretien sensiblement plus conséquents qu'après un hiver traditionnel. Une des contributions de ce document est de quantifier le caractère exceptionnel de l'hiver 2013-2014.

## 1.3 Études existantes

Par le passé, d'autres études sur les dégâts par submersion des tempêtes et sur les moyens de les relier aux données océaniques ont été menées. En effet, la protection des espaces littoraux est une politique majeure en France et dans tous les pays exposés aux océans. L'évolution de l'urbanisation [13] dans les zones littorales ainsi que l'augmentation du niveau de la mer ont accentué les risques de submersion dans les zones auparavant protégées [52]. En France, le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie est, entre autres, chargé d'évaluer et de prévenir ces risques. Une pratique commune est d'associer l'intensité d'un événement (comme la hauteur atteinte par l'eau) avec une *période de retour* qui est le

temps moyen attendu entre deux évènements d'intensité comparable. Notons que le concept de période de retour repose sur la stabilité statistique dans le temps (appelé aussi *stationnarité*) du phénomène aléatoire étudié, ce qui n'est pas nécessairement compatible avec le changement climatique actuellement observé (cet aspect sera discuté dans le dernier chapitre).

La littérature donne deux définitions principales de la période de retour d'évènements de submersion dont le calcul est fondé sur des paramètres d'aléas océaniques (comme la hauteur des vagues par exemple) [4]. La première méthode, appelée SVM (pour *Structural Variable Method* en anglais), se base sur l'utilisation de données multivariées pour établir un critère d'étude approprié. La seconde méthode utilise le calcul des probabilités de dépassement de seuils de manière conjointe pour deux variables distinctes ou plus. Il s'agit de la *Joint Probability Method* ou JPM [48]. Pour la submersion marine, des variables comme le niveau de la mer et la hauteur des vagues sont le plus souvent utilisées [17]. Néanmoins, il existe des méthodes plus complexes prenant en compte des variables comme la période des vagues pour, par exemple, calculer le niveau d'eau correspondant à une période de retour de 100 ans à Saint-Jean-de-Luz [63]. Dans tous les cas, la notion de période de retour d'un évènement de submersion marine est difficilement exploitable sans prendre en compte les risques considérés et la vulnérabilité du lieu étudié [7]. Ainsi, l'une des idées principales de ce travail est d'intégrer la notion de dégâts lors du calcul des périodes de retour en tentant de déterminer quels paramètres d'aléa jouent effectivement un rôle significatif dans la survenue de ces dégâts.

Dans cette optique, il faut créer une *fonction de dommage* liée à la submersion capable de prédire les dommages en fonction d'informations sur la submersion. Deux approches sont différenciées dans la publication de Merz [7]; d'un côté, les approches empiriques [6] pour lesquelles des données collectées suite à des évènements sont utilisées pour expliquer les dégâts; d'un autre côté, les approches synthétiques, pour lesquelles les données sont collectées en fonction des enjeux présents indépendamment des évènements de submersion et des dégâts [25]. Les variables déjà utilisées pour quantifier les dégâts dans ce type d'études peuvent être la hauteur de submersion [39], la vitesse d'inondation [23], la durée d'inondation [16], la présence de débris [28], la vitesse de montée des eaux [24], les dates [18] et les fréquences des submersions [27]. En revanche, peu d'études ont été menées pour lier les variables d'aléas océaniques (qui seront définies au chapitre 2) aux dégâts observés lors de submersion (voir chapitre 5).

Une des motivations de ce travail de thèse est la caractérisation des tempêtes de l'hiver 2013-2014 (dans le but, éventuellement, d'aider à l'amélioration de la gestion des constructions littorales). Pour parvenir à cela, il est primordial d'avoir des définitions claires des notions de tempête et de dégâts et du lien associant les deux notions. L'absence de consensus sur ces définitions peut conduire à des conflits entre parties, comme ce fut le cas, par exemple, pour la qualification de la tempête "Hercules" qui a notamment frappé la France le 7 janvier 2014. En effet, cet événement a été responsable d'importants dommages sur plusieurs villes du littoral Basque (Biarritz, Bidart, Anglet et Guéthary) sans que la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle soit actée (appellation CatNat [61]) par l'État français. Pourtant, la



FIGURE 1.3 – Logo du projet européen MAREA.

ville de Biarritz a rapidement estimé ses dégâts pour cet événement à environ 700 000 euros ce qui représente une somme qui n'est pas cohérente avec l'absence de Catastrophe Naturelle reconnue. Cela s'explique par la réglementation en vigueur qui assume qu'un événement de submersion peut être reconnu comme un événement de type "catastrophe naturelle" (appellation CatNat) si un important quantile de hauteur d'eau ou de hauteur de vague est atteint. La définition de ces quantiles est floue car basée uniquement sur des données d'observations couvrant des fenêtres temporelles plutôt courtes (de l'ordre de la dizaine d'années). Cet exemple, montre la nécessité de redéfinir les événements de submersion en fonction de critères plus spécifiques aux dégâts qu'ils provoquent.

Les travaux ayant déjà été effectués sur l'hiver 2013-2014 indiquent que les conditions d'aléa lors des événements de cet hiver sont extrêmes pour la période 1949-2015 [30]. D'autres travaux [2] ont également relevé des submersions en mer du Nord avec des conditions de pression atmosphérique et de hauteurs de vagues observées les plus importantes au cours des 60 dernières années. Enfin, concernant la côte Atlantique française, des travaux ont notamment été menés sur les changements de morphologie des plages [3] et sur leur reconstruction [29]. Dans ce document, nous nous intéresserons plus particulièrement aux dégâts provoqués par l'hiver 2013-2014. Ainsi, nous essayerons de montrer que le niveau d'intensité exceptionnel des tempêtes pendant cet hiver a conduit à un niveau de dommages lui aussi exceptionnel.

## 1.4 Objectifs et contributions

Le projet MAREA (Modélisation et Aide à la décision face aux Risques côtiers en Euskal Atlantique, voir figure 1.3) a débuté en mai 2016 suite à un appel à projets POCTEFA (Programme Interreg V-A Espagne-France-Andorre) qui est un programme européen visant à la coopération entre ces trois pays frontaliers pour le développement durable. Le projet MAREA regroupe des partenaires scientifiques mais également les gestionnaires du Groupe d'Intérêt Scientifique Littoral basque (GIS) (voir figure 1.4 pour la liste de tous les partenaires). L'un des objectifs du projet est d'améliorer les connaissances des risques liés aux tempêtes et c'est naturellement que ce travail de thèse s'inscrit dans ce projet.



FIGURE 1.4 – Différentes institutions partenaires du projet Européen MAREA.

Dans un tel contexte, trois axes d'étude ont été abordés au cours de cette thèse :

- Le premier axe s'est focalisé uniquement sur les *variables d'aléa* décrivant l'état de mer et le niveau d'eau. À cet effet, dans le chapitre 2, nous avons identifié les variables les plus susceptibles de caractériser l'intensité d'un événement de submersion. Le chapitre 3 fait ensuite un recensement complet des sources de données existantes, ce qui nous a permis d'obtenir des séries temporelles de variables d'aléa fiables, complètes et couvrant la période 1949-2015, prise comme période d'étude. Enfin, les jeux de données de variables d'aléa disponibles ont été comparés, préparés et validés dans le chapitre 4.
- Le second axe de travail a consisté en une recherche historique documentaire pour répertorier les événements de submersion ayant occasionné des dégâts sur la côte basque. Ce travail d'investigation sera détaillé dans le chapitre 5 et a donné lieu à l'établissement d'un catalogue de tempêtes.
- Le dernier axe de travail, présenté dans le chapitre 6, a été de lier les séries temporelles de variables d'aléa avec les données historiques concernant les dégâts obtenues dans le chapitre 5. Cela a permis de créer une fonction de dommages utilisant les valeurs des variables d'aléa pour prédire la présence ou l'absence de dégâts liés à la submersion. Cette fonction de dommages a ensuite, entre autres, permis de montrer le caractère exceptionnel des événements de l'hiver 2013-2014 sur la période 1949-2015.

Les résultats présentés dans ce document, notamment dans les chapitres 4 et 6, reposent sur un important travail de programmation dans les langages python et R [65] (voir notamment l'annexe A1). Les scripts réalisés sont disponibles sur demande.

Ce document est accompagné d'une série d'annexes décrivant plus en détails la recherche documentaire historique, contenant les trois articles déjà publiés suite à ce travail et résumant enfin le travail de programmation.

# Chapitre 2

## Variables permettant de décrire l'aléa de submersion

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Notion de vague</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Le niveau d'eau</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Définition d'un état de mer</b>	<b>14</b>
2.3.1	La méthode statistique : vague par vague	15
2.3.2	Analyse spectrale	15
2.3.3	Résumé	15
<b>2.4</b>	<b>Variables d'aléa liées à la submersion</b>	<b>17</b>
2.4.1	Variables caractérisant les vagues d'un état de mer	17
2.4.2	Niveau d'eau moyen	19
2.4.3	Variables transformées	19

---

Dans le cadre d'une étude sur les dégâts occasionnés par la mer, il est naturel, dans un premier temps, de définir les variables permettant de caractériser les événements de submersion. Comme le montre la figure 2.1, la submersion provient majoritairement des phénomènes de débordement par augmentation du *niveau d'eau* et de franchissement dû aux vagues. Ainsi, au cours de cette étude, les variables concernant les vagues et le niveau d'eau seront prises en compte. Ces différentes contributions et leurs influences sont présentées en détails dans les ouvrages [43] et [51]. Les caractéristiques liées aux vagues, comme leurs hauteurs ou leurs fréquences, jouent bien évidemment un rôle primordial dans ces phénomènes. Les mouvements d'eau proches des littoraux ne sont néanmoins pas uniquement induits par les vagues. En effet, le *niveau d'eau*, qui est la variation plus basse fréquence de l'élévation de la surface libre de la mer, liée notamment aux marées, est un élément qui peut avoir une influence considérable sur la submersion.

Pour un lieu donné et une période de temps fixée, les vagues sont décrites par la notion d'*état de mer*. Cela correspond typiquement à la synthèse de la hauteur des vagues, de leur fréquence et de leur direction, pour la période de temps considérée (en général 20-30 minutes). Dans ce travail, comme expliqué ci-dessus, afin

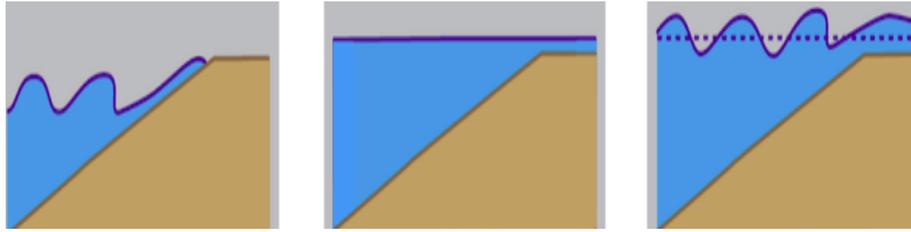


FIGURE 2.1 – Schéma issu de [43] décrivant les différents régimes de submersion : à gauche franchissement par vague, au milieu débordement par augmentation du niveau d'eau et à droite addition des deux phénomènes.

de pouvoir expliquer une éventuelle submersion, nous aurons également besoin de connaître, de façon simultanée, le niveau d'eau moyen. Dans le reste de ce document, l'expression *variables d'aléa* désignera l'ensemble des variables permettant de décrire un état de mer ainsi que le niveau d'eau. À partir de ces variables d'aléa, diverses combinaisons de variables plus informatives pour étudier la submersion peuvent être construites.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans un premier temps, des définitions plus précises des notions de vague, de niveau d'eau et d'état de mer seront données. Les variables d'aléa permettant d'expliquer une éventuelle submersion seront ensuite introduites.

## 2.1 Notion de vague

Les vagues sont des déformations de la surface de la mer initialement provoquées par le vent. Le vent au large forme des trains de vagues qui vont évoluer et se propager depuis le large vers les côtes sous l'effet de la gravité. Ces déformations se comportent comme une onde se propageant dans une direction donnée. Les trains de vagues dirigés vers les côtes seront ceux étudiés dans ce document. À l'approche des côtes et lors de conditions extrêmes, les vagues et les écoulements associés vont atteindre des endroits d'habitude abrités, ce qui définit un événement de submersion. Plusieurs caractéristiques d'un train de vagues sont à prendre en compte pour appréhender son impact à la côte, notamment, la hauteur, la période et la direction.

Étant donné un lieu fixé, le passage des vagues génère une oscillation de la surface libre qui peut être capturé par différents moyens (capteurs de pression, bouée de houle de surface mesurant l'accélération, mesure de la vitesse orbitale, etc.). La figure 2.2 montre un exemple de mesure réalisée par un capteur de pression. Afin de distinguer la notion de vague de celle de niveau d'eau, la tendance quasi-linéaire rouge sur la figure montre le changement de fond de l'élévation de l'eau liée à la marée. La faible pente de la droite rouge traduit la séparation des échelles de temps entre les vagues et la marée. A priori, en première approximation, on peut considérer que le signal des vagues n'est pas perturbé par ce lent changement de niveau d'eau lorsque la période d'observation est suffisamment courte. Ainsi, sur le temps de définition d'un état de mer, les vagues sont des variations haute fréquence de

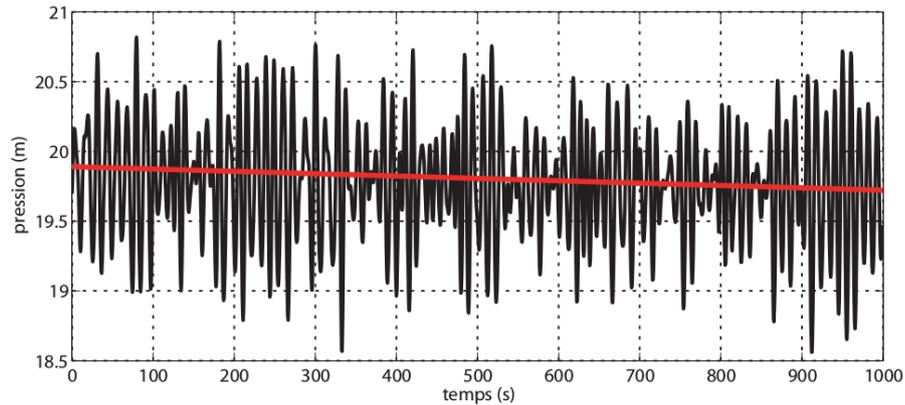


FIGURE 2.2 – Exemple de mesure de pression convertie en hauteur d’eau, par 20 mètres de fond environ dans l’anse de Berthaume, le 31 janvier 2004. Données d’un capteur de pression sur un temps court (1000 secondes). Les oscillations représentent le changement de l’élévation de la surface de l’eau. La tendance rouge représente le changement de fond lié à la marée. La figure provient du cours sur les états de mer de Fabrice Ardhuin et Philippe Bonneton.

l’élévation de l’eau, indépendantes du niveau d’eau moyen qui varie de manière significativement plus lente.

La figure 2.3 montre un exemple de signal d’élévation de la surface de l’eau en fonction du temps sur une courte période. La référence, correspondant au niveau moyen de l’élévation de la surface de l’eau pendant le temps de mesure, est fixée à zéro. Une vague unitaire correspond alors à l’intervalle entre deux instants où l’élévation de surface passe par ce niveau moyen lors de sa phase descendante. Cette méthode est appelée *zero-down-crossing* (par opposition à *zero-up-crossing* si le signal est découpé avec les phases ascendantes de l’élévation de l’eau) [53]. Chaque vague est ainsi identifiée et il est possible d’extraire sa *hauteur*  $H$  (différence en mètres entre l’élévation d’une crête et d’un creux successifs de l’onde) et sa *période*  $T$  (temps en secondes entre deux crêtes ou entre deux creux de vagues).

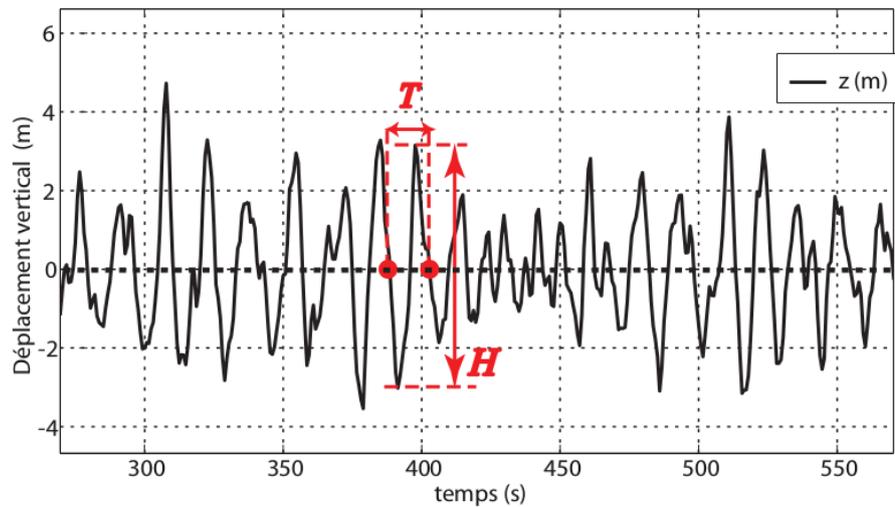


FIGURE 2.3 – Exemple de déplacement mesuré par une bouée houlographe, qui suit le mouvement de la surface, au large de Crozon en mai 2004. Les deux points rouges délimitent une vague. L'information liée à chaque vague peut ainsi être extraite et il est possible de calculer des indicateurs statistiques pour un temps de mesure donné. La figure provient du cours sur les états de mer de Fabrice Ardhuin et Philippe Bonneton.

## 2.2 Le niveau d'eau

Le niveau d'eau  $\eta$  est défini comme la hauteur lissée (sans tenir compte de vagues) de la surface de l'océan par rapport à une référence stable. C'est une grandeur qui est conditionnée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le phénomène déterministe des marées qui est régi par le mouvement des astres du système solaire et par l'inertie de la révolution de l'astre terrestre sur lui-même. Ce mouvement étant bien connu et bien décrit, le niveau d'eau est estimable via des modèles mathématiques harmoniques, comme cela sera fait au cours de la section 3.2.2. Les services de prédiction des marées, en France le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), sont chargés de donner le niveau d'eau en mètres lié à la marée astronomique. Cette valeur ne prend pas en compte la pression atmosphérique et le vent notamment. Ces phénomènes naturels vont ajouter une composante stochastique au niveau d'eau qu'on appelle la *surcote* (ou encore *décote* en cas de diminution du niveau d'eau) qui peut modifier le niveau d'eau de manière non négligeable, notamment quand les conditions météorologiques se rapprochent des conditions dites de tempête (vents importants et pression atmosphérique basse). Ainsi, à un instant donné, le niveau d'eau observé est la somme entre le niveau d'eau issu de la marée astronomique et la surcote. Quand on approche des côtes, dans la zone de déferlement, la dissipation d'énergie génère un gradient de pression dans la colonne d'eau qui induit également une élavation du niveau d'eau qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres en condition extrêmes, il s'agit du set-up [60].

Le niveau d'eau, qui joue un rôle fondamental dans la submersion, a également des variations à des fréquences intermédiaires liées à la présence des vagues que

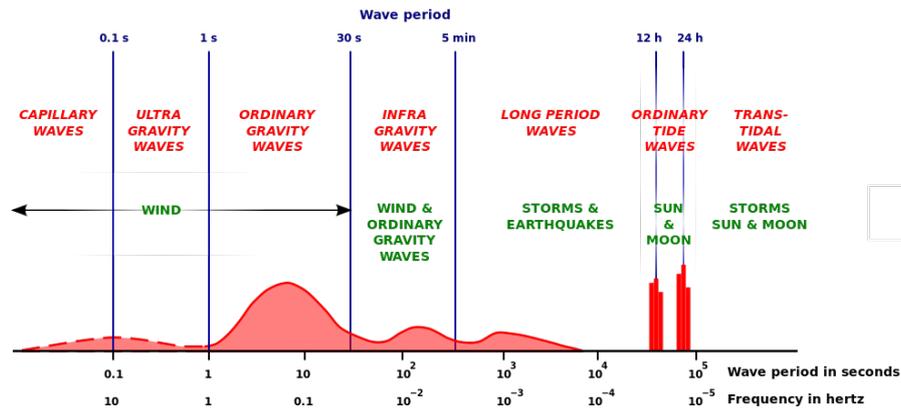


FIGURE 2.4 – Schéma de classification des vagues en fonction de leur période issue de [35].

l'on appelle communément infragravité. En effet, les variations de tension de radiation liées à la présence de groupe de vagues ou de position dans le point de déferlement [59] génèrent des ondes basses fréquences qui peuvent jouer un rôle important dans le phénomène de submersion. Plus généralement, la pertinence de séparer niveau d'eau et vague peut être discutée car ce niveau d'eau est finalement le siège d'ondes de surface dont les fréquences couvrent un spectre très large comme le montre la figure 2.4 issue de [35]. Néanmoins, dans ce document, nous prenons le parti de réaliser ce découpage qui simplifie la vision du problème. Sur la figure 2.5 les différentes composantes du niveau d'eau sont représentés : le niveau  $\eta$  qui peut être représenté comme la somme du niveau moyen  $Z_0$ , de la marée astronomique  $M$  et de la surcote atmosphérique  $S$ , le *run-up*  $R$  est la contribution des vagues au niveau d'eau détaillée lors de la section 2.4.3.ii et enfin  $TWL$  (pour *Total Water Level* en anglais) est le niveau total résultant de la somme entre  $\eta$  et  $R$ .

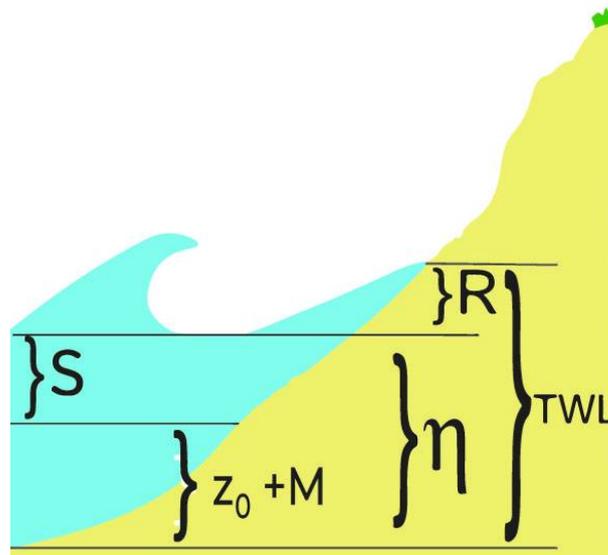


FIGURE 2.5 – Schéma de représentation des différentes composantes du niveau d'eau au bord d'une plage.  $\eta$  est le niveau d'eau mesurable,  $Z_0$  est le niveau moyen en un lieu donné,  $M$  est la composante de marée astronomique,  $S$  est la surcote océanique,  $R$  est le run-up défini dans la section 2.4.3.ii et  $TWL$  est le niveau d'eau total.

## 2.3 Définition d'un état de mer

Comme cela a été indiqué précédemment, étant donnée une fenêtre temporelle et un lieu, dans le cadre de ce travail, un état de mer correspondra à une synthèse de la hauteur, de la période et de la direction des vagues, pour la date, la durée et le lieu considérés. Une fenêtre temporelle de vingt ou trente minutes est généralement utilisée. Un tel ordre de grandeur est typiquement suffisamment court pour se prémunir d'un changement trop important des conditions et suffisamment long pour que la synthèse obtenue soit représentative. De plus, pour une étude longue durée à l'échelle des tempêtes cela sera suffisant pour représenter les dégâts.

Le niveau d'eau sera ajouté aux variables d'état de mer, pour former les variables d'aléa. Caractériser un état de mer relativement au niveau d'eau ne présente pas de difficulté. En effet, la variation du niveau d'eau étant très faible sur une période de trente minutes, on pourra par exemple prendre le niveau moyen sur la période, voire même le niveau en début ou en fin de période. Ce choix aura a priori un très faible impact pratique.

Relativement aux vagues, il existe deux méthodes principales pour caractériser un état de mer (c'est-à-dire, synthétiser les trains de vagues au lieu, à la date et pour la durée considérés) : une méthode statistique et une méthode spectrale. Les principes de ces deux méthodes vont être brièvement décrits dans les deux sections suivantes.

### 2.3.1 La méthode statistique : vague par vague

Dans la section précédente, la figure 2.3 montre un exemple de mesures de l'élévation de l'eau et de la méthode pour repérer une vague. Pour un intervalle de temps donné  $[t_{min}, t_{max}]$ , il est ainsi possible d'identifier une série de  $n$  vagues aux temps  $t_1, \dots, t_n \in [t_{min}, t_{max}]$ . A cette série correspond une série bivariée de mesures  $(H_t, T_t)_{t \in \{t_1, \dots, t_n\}}$ , où  $H_t$  et  $T_t$  sont la hauteur et la période, respectivement, de la vague observée au temps  $t \in \{t_1, \dots, t_n\}$ . Cette série bivariée contient l'essentiel des informations sur l'état de la mer au lieu, à la date et pour la durée considérés. Dans le cadre de l'approche statistique, un état de mer consistera simplement en un résumé statistique de la série précédente.

### 2.3.2 Analyse spectrale

Comme l'approche statistique, l'analyse spectrale va permettre de capturer le caractère aléatoire des vagues suivant une approche basée sur la transformée de Fourier. En effet, le signal d'élévation de surface peut se décomposer en une superposition de cosinus et de sinus. Le *spectre* représente alors la répartition de l'élévation (souvent appelée énergie de manière abusive) en fonction d'un ensemble de fréquences (il est aussi possible de réaliser un spectre de l'énergie en fonction de la fréquence et de la direction des vagues).

Ainsi, à partir d'un signal d'élévation de l'eau, comme celui représenté dans la figure 2.3, il est possible de calculer le spectre (Figure 2.6) représentant la densité d'énergie en fonction de la fréquence. Le raisonnement mathématique d'obtention du spectre ne sera pas détaillé dans ce document. Le lecteur intéressé pourra se référer au manuel [53] pour de plus amples informations à ce sujet. Dans le cadre de l'approche spectrale, dans cette étude, un état de mer consistera simplement en un résumé mathématique du spectre par un ensemble de variables de vagues dites spectrales.

### 2.3.3 Résumé

La figure 2.7 résume les méthodes d'obtention des variables caractéristiques d'un état de mer. Soit un signal d'élévation continu sur l'intervalle de temps connu (1 sur la figure). Le signal peut se découper en plusieurs états de mer consécutifs notés  $[t_0, \dots, t_i, \dots, t_f]$ . Pour caractériser un état de mer  $t_i$  il est possible d'obtenir ses caractéristiques liées aux vagues au travers de son spectre (noté 2' sur la figure). Une autre possibilité d'obtenir les informations de vagues est de découper l'état de mer  $t_i$  en  $n$  vagues, chaque vague peut se caractériser par sa hauteur, sa période et sa direction. Le tableau 2 résume les informations de chaque vague pour l'état de mer  $t_i$ . Les deux méthodes mènent au tableau 3 sur la figure où chaque état de mer est caractérisé par les variables qui seront détaillées au cours des sections suivantes.

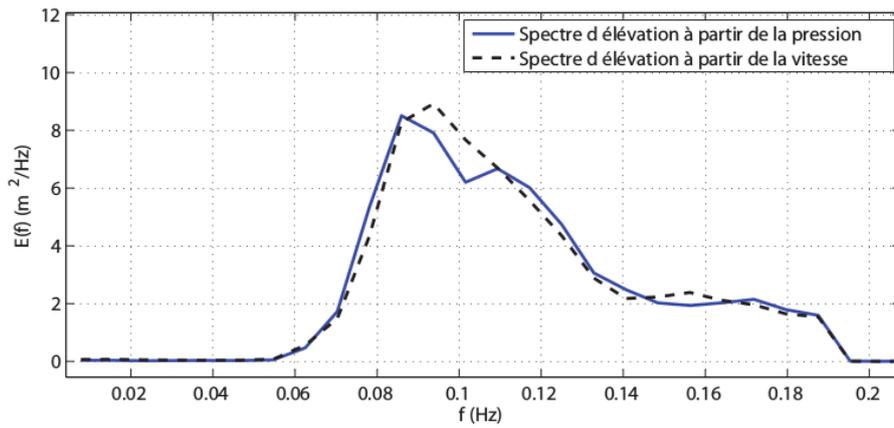


FIGURE 2.6 – Spectre de la densité d'énergie ( $E$ ) en fonction de la fréquence ( $f$ ) correspondant à la figure 2.2. La figure provient du cours sur les états de mer de Fabrice Ardhuin et Philippe Bonneton.

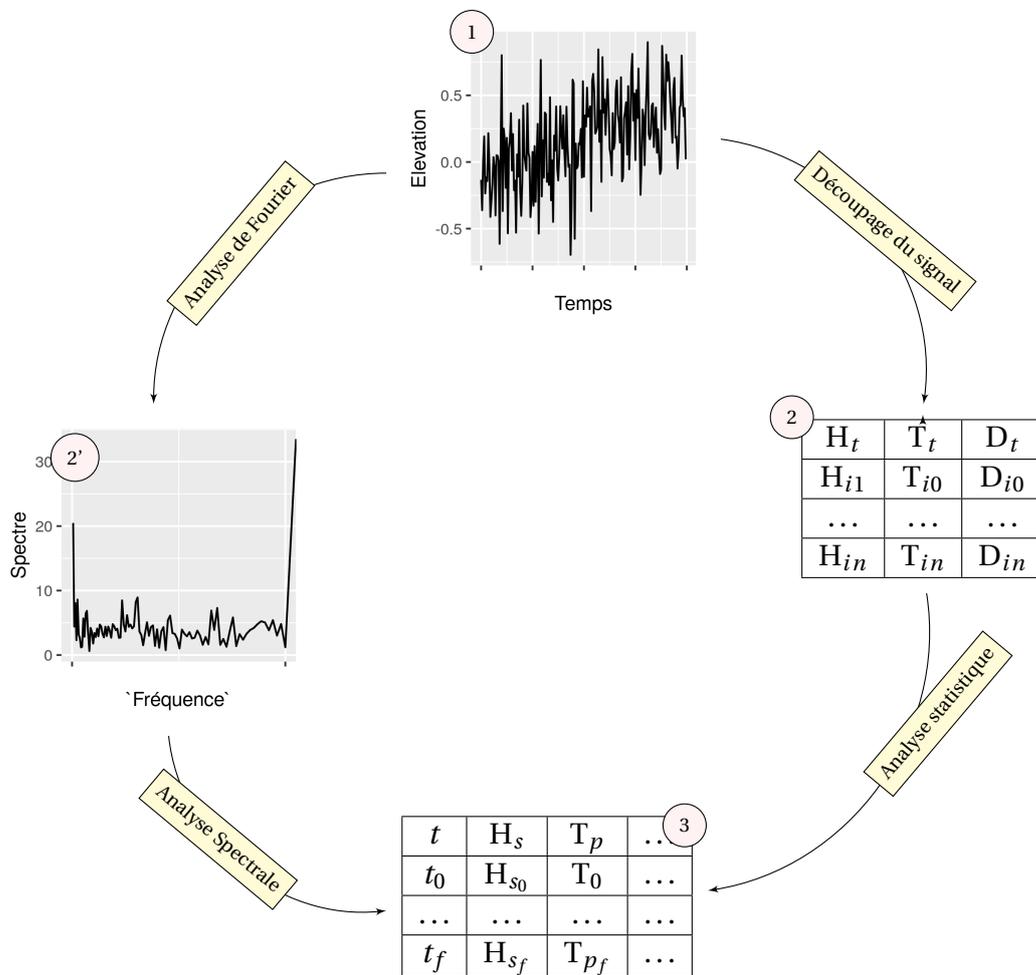


FIGURE 2.7 – Schéma d'obtention des données d'état de mer. Le graphe 1 représente un signal d'élévation de l'eau. Le graphe 2' est un spectre issu d'un état de mer  $t_i$ . Le tableau 2 résume l'information de chaque vague d'un état de mer  $t_i$ . Le tableau 3 donne les caractéristiques de chaque état de mer issu de l'élévation 1. Les graphiques sont réalisés avec des données factices.

## 2.4 Variables d'aléa liées à la submersion

Comme évoqué précédemment, étant donnés une fenêtre temporelle et un lieu, un état de mer correspond essentiellement à une synthèse de l'état de la mer en terme de vague au lieu, à la date et pour la durée considérés. En fonction de l'approche choisie (statistique ou spectrale), les variables caractérisant cette synthèse peuvent être calculées de plusieurs façons. En plus de ces variables, le niveau d'eau de la mer sera ajouté pour former les *variables d'aléa* caractérisant la submersion.

### 2.4.1 Variables caractérisant les vagues d'un état de mer

#### 2.4.1.i Hauteur significative

Comme cela a été dit précédemment, la hauteur  $H$  d'une vague est la différence en mètres entre l'élévation de son creux et de sa crête. Le plus souvent, pour caractériser un état de mer, la hauteur significative, notée  $H_s$ , est utilisée. Historiquement, cette valeur correspond de manière grossière à celle décrite par un observateur expert qui regarde les vagues pendant la durée d'un état de mer.

Lors d'une analyse vague par vague, la moyenne de la hauteur du tiers supérieur des vagues repérées pendant la période de mesure, notée  $H_{1/3}$ , est utilisée pour définir la hauteur significative de vague.

Dans le cadre de l'approche spectrale, on part du spectre de la densité d'énergie  $E(\nu)$  en fonction de la fréquence  $\nu$ . La hauteur significative  $H_s$ , notée  $H_{m0}$  dans ce cas peut alors être calculée par la formule suivante :

$$H_s = H_{m0} = 4 \times \sqrt{\int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} E(\nu) d\nu}, \quad (2.1)$$

où  $\nu_{min}$  et  $\nu_{max}$  sont la fréquence minimum et la fréquence maximum du spectre.

Dans le reste de ce document, la hauteur significative sera notée  $H_s$  et, sauf mention contraire, fera référence à une valeur calculée dans le cadre de l'approche spectrale par la formule (2.1). En effet, les simulations numériques, décrites dans la section 3.1.2, fournissent pour un état de mer donné son spectre d'énergie.

#### 2.4.1.ii Période moyenne

Comme cela a été évoqué dans la Section 2.1, une vague est également caractérisée par sa période  $T$  qui est le temps écoulé entre deux passages de crêtes. Il est à noter que cette grandeur est liée à la longueur d'onde  $\lambda$  qui est la distance entre deux crêtes et à la célérité de propagation.

Dans le cadre de l'approche statistique pour caractériser l'état de la mer sur la période  $[t_{min}, t_{max}]$ , il est naturel d'utiliser la moyenne des périodes  $(T_t)_{t \in \{t_1, \dots, t_n\}}$ , où  $t_1, \dots, t_n$  sont les temps correspondants aux  $n$  vagues identifiées.

Dans le cadre de l'approche spectrale, la période moyenne sur la durée considérée peut être calculée à partir du spectre  $E$  de l'élévation de la surface de la mer. Plusieurs formules, correspondant aux équations (2.2), (2.3), (2.4) et (2.5) ci-après peuvent être utilisées. Cela conduit à quatre versions de la période moyenne, notées  $T_p$ ,  $T_{m01}$ ,  $T_{m02}$ ,  $T_{m10}$ , et définies respectivement par :

$$T_p = \frac{1}{\nu_p}, \quad (2.2)$$

où  $\nu_p$  est la fréquence pour laquelle l'élévation  $E$  est maximum sur le spectre,

$$T_{m01} = \sqrt{\frac{m_0}{m_1}} \quad (2.3)$$

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.4)$$

$$T_{m10} = T_e = \sqrt{\frac{m_{-1}}{m_0}} \quad (2.5)$$

où  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_{-1}$  sont, respectivement, les moments d'ordre 0, 1, 2 et  $-1$  de l'élévation  $E$ ,

et où le moment d'ordre  $p$  est défini par  $m_p = \int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} E(\nu) \nu^p d\nu$  avec  $\nu_{min}$  et  $\nu_{max}$  fréquences minimum et maximum du spectre considéré (on pourra noter que le moment d'ordre 0  $m_0$  intervient dans le calcul de  $H_s$ , formule 2.1).

Ces différentes définitions de la période pour décrire un état de mer, toutes fonctions du spectre de l'élévation  $E$ , ne donnent pas néanmoins la même information :

- $T_p$  appelée période pic représente la période des vagues qui contribuent le plus à l'énergie de l'état de mer;
- $T_{m01}$  et  $T_{m02}$  sont des périodes moyennes obtenues à partir de l'ensemble du spectre en donnant de l'importance à chaque valeur de fréquence présente dans l'état de mer, et à ce titre, représentent des périodes comparables à la période moyenne obtenue à l'aide de l'approche statistique;
- $T_e$ , appelée la période énergétique, représente la période que devrait avoir un état de mer monochromatique de même hauteur significative pour assurer une équivalence en terme d'énergie entre les deux états de mer. C'est la période utilisée pour les études liées à l'énergie des vagues.

#### 2.4.1.iii Direction moyenne

La direction d'un train de vagues est naturellement mesurée par son angle par rapport au nord. C'est un paramètre important car, en tant qu'onde, les vagues sont

soumises aux phénomènes de réfraction, diffraction et réflexion. Et donc la direction d'un train de vague sera une caractéristique importante pour son impact à la côte.

À partir des mesures brutes issues d'une bouée de surface qui donne accès au déplacement dans toutes les directions, il est possible [53], après manipulation mathématiques et moyennant certaines hypothèses, d'extraire la direction moyenne sur la fenêtre temporelle considérée, notée  $\theta_m$ , et la direction pic, notée  $\theta_p$ , c'est-à-dire, la direction la plus fréquente. Dans ce document, la direction moyenne  $\theta_m$  sera utilisée.

## 2.4.2 Niveau d'eau moyen

Le niveau d'eau moyen sur la fenêtre temporelle fixée pour définir l'état de mer sera considéré dans ce travail comme une caractéristique essentielle de l'aléa. Il faut noter que, comme évoqué précédemment, étant donné sa faible variation sur une période de trente minutes, la façon de résumer le niveau d'eau n'a aucune influence en pratique. Pour un état de mer donné à une date  $t$  quelconque, en plus des variables de vagues ( $H_{s,t}, T_{p,t}, \dots$ ), le niveau d'eau  $\eta_t$  devra être donné. Dans la section 3.2, les différentes méthodes d'obtention de cette variable seront détaillées.

## 2.4.3 Variables transformées

Les variables présentées dans la section précédente caractérisent uniquement l'état de l'océan en un lieu et sur une fenêtre de temps fixés. En complément, des variables transformées (ou agrégées) peuvent être calculées pour obtenir des informations qui ont un sens physique plus pertinent pour appréhender un phénomène de submersion.

Le *flux* d'énergie qui représente la quantité d'énergie véhiculée par les vagues par seconde et par mètre de crête est une variable transformée bien évidemment très intéressante en terme physique. De même le *run-up* qui est défini par un quantile particulier de la hauteur atteinte par les vagues à un endroit sur le littoral considéré et durant l'état de mer en question est également fondamental en terme de risque. Pour chaque état de mer pour un lieu donné, il sera possible de calculer une valeur de ces deux nouvelles variables.

### 2.4.3.i Flux énergétique

Selon la théorie ondulatoire des vagues, il n'y a pas de transport de masse (au transport du second ordre près [58] et en dehors de la zone de déferlement) mais uniquement un déplacement d'énergie qui est constitué d'une partie cinétique due au mouvement du fluide et d'une partie provenant du changement de hauteur qu'induisent les vagues dans la masse d'eau.

Le flux d'énergie permet de quantifier ce transport d'énergie par les vagues. C'est une grandeur locale. Ce flux d'énergie sera noté  $P$  car il peut être aussi vu comme une puissance par  $m$  de crête de vague et son unité est le Joule par mètre par seconde ( $J.m^{-1}.s^{-1}$ ). Dans une étude concernant les dégâts, la notion de flux d'énergie est pertinente. En effet, le flux se conserve modulo les processus de dissipation des vagues principalement dûe au déferlement, et donc localement, le flux d'énergie représente effectivement l'énergie qui arrivera à la côte lors d'un évènement, quel que soit l'endroit où ce flux est mesuré. Dans ce contexte il sera alors judicieux d'intégrer ce flux sur l'ensemble de la durée de la tempête, ce qui permettra d'estimer la quantité totale d'énergie associée à une tempête en un point particulier du littoral.

Étant donné un lieu, les grandeurs utiles pour le calcul de  $P$  sont :

- la profondeur  $h$  (en  $m$ ) au lieu considéré;
- la force gravitationnelle  $g = 9.81 m.s^{-2}$ ;
- la masse volumique de l'eau de mer  $\rho_w = 1025 kg.m^{-3}$ ;
- la longueur d'onde  $\lambda$  (en  $m$ ) au lieu considéré, solution de l'équation de dispersion, issue de la théorie linéaire des vagues [53], suivante pour la période énergétique considérée  $T_e$  (dont le calcul est donné par la formule (2.5)) :

$$\left(\frac{2\pi}{T_e}\right)^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right);$$

- la densité d'énergie des vagues  $E_{wave}$  (en  $J.m^{-2}$ ) au lieu considéré, donnée, en fonction de la hauteur significative  $H_s$ , par :

$$E_{wave} = \frac{1}{16} \rho \times g \times H_s^2;$$

- la célérité de phase  $c_p$  (en  $m.s^{-1}$ ) (la vitesse à laquelle une phase de vague se déplace) donnée par :

$$c_p = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)};$$

- la célérité de groupe (la vitesse à laquelle la superposition des ondes ou encore l'énergie est transportée) donnée par :

$$c_g = \frac{1}{2} c_p \left( 1 + \frac{4\pi h}{\lambda} \times \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)} \right).$$

Le flux se calcule alors finalement avec la formule :

$$P = E_{wave} \times c_g. \quad (2.6)$$

### 2.4.3.ii Run-Up

Dans ses travaux ([37] et [36]), Stockdon a utilisé un système de caméras vidéo et des mesures par des bouées pour établir un lien entre les états de mer et la hauteur atteinte par les vagues sur plusieurs plages aux caractéristiques connues. L'utilisation de caméras vidéo a permis de mesurer avec précision la hauteur atteinte par l'eau. D'un autre côté, les bouées de mesures ont fourni les caractéristiques des états de mer au large. Grâce à l'ensemble de ces données, une relation empirique a été établie pour relier la hauteur atteinte observée et les caractéristiques au large. Cette relation est établie en prenant en compte les spécificités de la plage considérée notamment caractérisée par sa pente  $\beta$  (en %). Cette valeur est en constante évolution via l'effet de transport sédimentaire induit par les vagues. Dans notre étude, compte tenu de l'inconnue que représente l'évolution de la pente de plage au cours des années, nous serons contraints de supposer le paramètre  $\beta$  constant. Cela constitue clairement une hypothèse importante pour l'étude réalisée dans ce document qui couvre plusieurs dizaines d'années.

Le *run-up*  $R$  est la hauteur atteinte par l'eau après déferlement d'une vague, comme le montre la figure 2.5. Cette valeur de hauteur peut facilement s'ajouter au niveau d'eau de manière à représenter physiquement les hauteurs atteintes pour un état de mer donné. Il est assez facile de déterminer un seuil réel (mur, haut d'une plage) représentant la limite à franchir par le run-up pour être en présence d'un événement de submersion.

Dans son étude, Stockdon distingue la partie gravitaire et la partie infragravitaire du déferlement dans la zone de swash des vagues, ainsi que la partie associée au *setup* (surélévation local du niveau de la mer induit par le déferlement d'une vague comme indiqué précédemment).

Pour un état de mer, le calcul suivant donne la hauteur dépassée par 2% des vagues de cet état de mer :

$$R_{2\%} = 0.35 \times \sqrt{H_s \times \frac{gT_p^2}{2\pi} \times \beta} + 0.75 \times \sqrt{H_s \times \frac{gT_p^2}{2\pi} \times \beta} + 0.06 \times \sqrt{H_s \times \frac{gT_p^2}{2\pi}}, \quad (2.7)$$

où  $H_s$  et  $T_p$  sont données par (2.1) et (2.2), respectivement. Ainsi, la formule (2.7) peut être décomposée en trois parties :

- la partie associée au setup :  $R_v = 0.35 \times \sqrt{H_s \times \frac{gT_p^2}{2\pi} \times \beta}$ ;
- la partie incidente du swash :  $R_{inc} = 0.75 \times \sqrt{H_s \times \frac{gT_p^2}{2\pi} \times \beta}$ ;
- la partie infragravitaire du swash :  $R_{IG} = 0.06 \times \sqrt{H_s \times \frac{gT_p^2}{2\pi}}$ .

Comme cela a déjà été évoqué auparavant, la valeur  $R_{2\%}$  calculée par (2.7) pour une plage de pente  $\beta$  a une interprétation physique évidente puisqu'elle peut être comparée à une hauteur limite qui, si elle est dépassée, peut conduire à des dégâts. Nous pouvons également noter que sur la figure 2.5, la somme  $R_{2\%} + \eta$  donne

le niveau d'eau total qui sera appelé TWL pour *Total Water Level* dans la suite du document. Néanmoins, cette formulation empirique a été obtenue par comparaison entre variables d'état de mer et observations vidéo pour un sous-ensemble de plages connues et ouvertes. Les résultats issus de cette formulation ne sont pas nécessairement réalistes pour les plages du Pays Basque. Par exemple, la *Grande Plage* de Biarritz, qui sera par la suite étudiée dans ce document, se présente sous la forme d'une baie enrochée et se termine par un muret. Ces différences avec les plages étudiées par Stockdon induisent un biais d'utilisation de la formule (2.7). Dans le cas présent et compte tenu de la nature de l'étude présentée ici, les résultats qualitatifs obtenus par cette formulation seront suffisants pour une étude liée aux dégâts. La pente utilisée pour la *Grande Plage* sera constante et fixée à 0.008%, cette valeur a été obtenue à partir des relevés topographiques effectués entre décembre 2017 et janvier 2019. Cela correspond à la partie proche de la côte de la plage uniquement. Cette partie représente la partie de la plage qui est majoritairement impliquée dans la submersion. L'objectif de cette première approche est d'obtenir une variable pouvant être représentative des dégâts.

# Chapitre 3

## Séries temporelles d'états de mer et de niveaux d'eau

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Séries temporelles d'états de mer liées aux vagues</b>	<b>24</b>
3.1.1	Séries issues de mesures de bouées houlographiques	24
3.1.2	Séries issues de simulations numériques	26
<b>3.2</b>	<b>Séries temporelles de niveaux d'eau</b>	<b>29</b>
3.2.1	Marégraphes	29
3.2.2	Réanalyse	30
<b>3.3</b>	<b>Format des données</b>	<b>33</b>

---

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la notion d'état de mer permet de résumer l'état de surface de l'océan en un lieu donné sur une courte période (typiquement, une trentaine de minutes) à l'aide de diverses variables, comme, par exemple, la hauteur de vague significative  $H_s$ , la période pic  $T_p$  ou la direction  $\theta_m$ . Le niveau d'eau  $\eta$  vient compléter les variables d'état de mer pour former ce que l'on appelle dans ce document les variables d'aléa. Rappelons qu'il existe également des variables transformées ou agrégées (par exemple, le flux  $P$ ), qui peuvent se révéler pertinentes d'un point de vue physique.

Afin de réaliser l'objectif de ce travail de thèse, c'est-à-dire, comprendre le lien existant entre les variables d'aléa et la submersion éventuelle en un point du littoral, il faut disposer de séries temporelles de données décrivant simultanément l'état de l'océan et la submersion au lieu considéré. Dans ce chapitre, les séries temporelles horaires d'états de mer et de niveau d'eau disponibles pour la côte basque depuis approximativement 1950 seront décrites. Les séries temporelles liées à la submersion et aux dégâts à la côte feront l'objet du chapitre 5.

En ce qui concerne les vagues, les séries temporelles à disposition proviennent soit de l'observation directe de l'état de l'océan par le biais de bouées de surface, soit de simulations numériques réalisées à partir de champs de vents. Ces séries temporelles seront décrites dans la première section. Pour ce qui est du niveau d'eau, la

deuxième section expliquera comment les données de marégraphes peuvent être complétées à l'aide de calculs déterministes pour obtenir des séries temporelles de niveau d'eau pour de longues périodes de plusieurs dizaines d'années.

### 3.1 Séries temporelles d'états de mer liées aux vagues

Dans un premier temps, nous allons décrire les données existantes concernant les vagues pour la côte basque. Les observations réalisées à partir de systèmes de mesures sur place seront complétées par des simulations numériques. Cela permettra d'obtenir des jeux de données ayant une couverture temporelle suffisamment importante pour espérer établir par la suite un lien avec les dommages à la côte.

#### 3.1.1 Séries issues de mesures de bouées houlographiques

Les mesures par bouées houlographiques permettent de récupérer le signal de l'élévation de la surface de l'eau en fonction du temps en un point précis. La mesure de l'évolution de la surface libre est en général basée sur l'utilisation d'accéléromètres qui permettent par intégration successives de reproduire le mouvement de la bouée de surface suivant les 6 degrés de liberté. Les méthodes statistique ("vague par vague") et spectrale décrites dans les sections 2.3.1 et 2.3.2, respectivement, sont donc applicables afin d'obtenir une synthèse de ce signal sur la fenêtre temporelle choisie (typiquement, trente minutes) et calculer les descripteurs d'états de mer comme  $H_s$ ,  $T_p$ , etc, introduits dans le chapitre précédent.

En France, le CEREMA, service technique du Ministère de l'Écologie avec l'aide des centres de recherche, a déployé le réseau de bouées CANDHIS (Centre d'Archivage National de Données de Houle *In Situ*) pour répondre aux problématiques liées à l'ingénierie côtière (risques, navigation, dimensionnement d'ouvrages,...) et obtenir des données d'observation pour les besoins de la recherche. Ce réseau couvre actuellement 19 points le long des côtes françaises.

Le CEREMA prend en charge le déploiement des bouées. Pour chaque bouée, une série temporelle de descripteurs d'états de mer (pour les vagues uniquement) est calculée. Selon la technologie de la bouée considérée, toutes les variables ne seront pas fournies. Il faut noter que cette série temporelle est corrigée afin de retirer les valeurs aberrantes liées par exemple à l'entretien des bouées ou aux collisions avec ces dernières. Même si la fenêtre temporelle d'observation pour un état de mer est toujours de vingt ou trente minutes, les pas de temps entre deux états de mer dans la série peuvent varier selon les campagnes et les période de mesures. Les données sont stockées sur des serveurs et accessibles via le site web de CANDHIS. L'ensemble des méthodes liées aux mesures par bouée en France est résumée dans la documentation du CEREMA [14].

On dénombre trois campagnes concernant le Pays basque français avec des bouées localisées approximativement en face de Bayonne, Anglet et Saint-Jean-de-

	Bayonne	Anglet	Saint-Jean-De-Luz
Latitude	043°32,800'N	043°31,930'N	043°24,500'N
Longitude	001°32,600'W	001°36,900'W	001°40,900'W
Début	09/11/1989	24/11/2009	24/04/2013
Fin	25/07/1994	20/06/2017	23/07/2017
Profondeur (m)	20.0	50.0	20.0
Distance à la côte (km)	1.1	5.3	1.6

TABLEAU 3.1 – Les bouées du réseau Candhis utilisées dans le cadre de cette étude. Seule la bouée de Bayonne a cessé de fonctionner. Les dates correspondent à la fenêtre de temps utilisé dans ce document pour ces bouées.

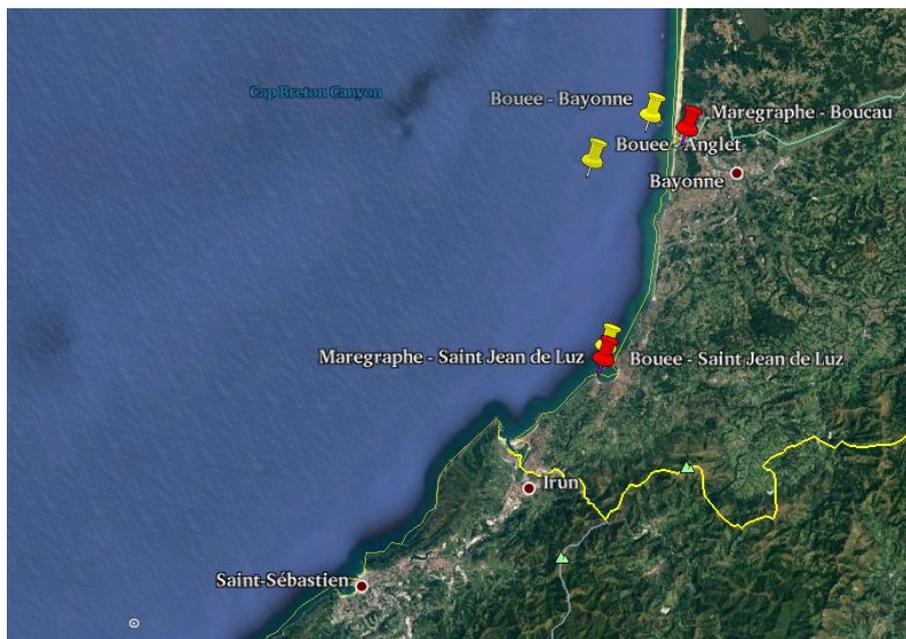


FIGURE 3.1 – Situations des bouées de mesures et des marégraphes pour le Pays basque français. Image réalisée grâce à Google Earth.

Luz. Les caractéristiques de ces campagnes sont détaillées dans le tableau 3.1. Sur l'image de la figure 3.1 détaille la répartition des bouée par rapport à la côte.

Compte tenu de la technologie utilisée et des qualifications de l'exploitant, une bonne confiance sera accordée aux séries temporelles d'états de mer obtenues à partir des bouées. Nous verrons au chapitre 4 qu'elles pourront ainsi servir de référence pour évaluer la qualité de simulations d'états de mer. Plusieurs inconvénients importants peuvent néanmoins être soulignés pour ce qui est de l'objectif poursuivi dans ce travail comme le montre le tableau 3.1 : le nombre de campagnes est faible, la couverture spatiale n'est pas très importante et, surtout, la couverture temporelle est également limitée. Ainsi, les trois campagnes ne couvrent que quelques années, ce qui est plutôt limitant dans le cadre d'une étude historique.

Pour notre étude, seules les séries temporelles issues de la bouée d'Anglet et de la bouée de Saint-Jean-de-Luz seront utilisées en tant que données d'observations au large. Dans la suite du document, ces séries seront notées **BOUEE.ANG** et

BOUEE.SJL, respectivement.

### 3.1.2 Séries issues de simulations numériques

La section précédente montre qu'il ne sera pas possible, dans le cadre d'une étude sur plusieurs dizaines d'années, de compter uniquement sur les séries temporelles d'états de mer obtenues à partir de bouées de mesure de l'état de mer. Pour remédier à cela, deux séries temporelles d'états de mer simulées seront utilisées. Les modèles physiques utilisés pour reproduire les mouvements des vagues seront succinctement présentés dans les sections suivantes mais le point de vue sera plutôt axé sur l'utilisation des données simulées.

Le principe de base pour reproduire le mouvement des vagues est d'utiliser des séries temporelles simulées de champs de vents obtenues grâce à des réanalyses réalisées à l'aide de données de températures. Les modèles numériques de génération et de propagation de la houle spectrale sont basés sur une approche linéaire de la houle [34] et la conservation de la densité d'action des vagues [33] avec l'introduction de termes source (pour la génération notamment) et puits (i.e., frottement sur le fond, déferlement) sur une grille de points qui représente le domaine océanique étudié. La résolution du système d'équation sur une grille spatiale, temporelle et spectro-angulaire permet de calculer l'évolution du spectre d'énergie dans le domaine étudié. Et ainsi, *in fine*, d'estimer les descripteurs d'états de mer comme  $H_s$ ,  $T_p$ , etc, en fonction du temps. En plus d'utiliser des champs de vent, ces simulations utilisent d'autres variables d'entrée, comme les courants marins ou la bathymétrie (mesure de la topographie des fonds marins) à un endroit donné. De manière générale, les simulations présentent des biais liées aux données utilisées en entrée. En effet, les différentes technologies utilisées pour recueillir ou produire les données de vent n'ont pas la même fiabilité en fonction de l'époque. Par exemple, avant les années 1970, il n'y avait aucun satellite lié aux données météorologiques, ce qui rend la qualité des données non homogène sur l'ensemble de la période étudiée.

Dans ce travail, deux séries temporelles simulées d'états de mer (restreints aux variables liées aux vagues et sans le niveau d'eau) ont été utilisées. Les deux jeux de données ont des caractéristiques différentes, détaillées dans les sections suivantes. L'avantage principal de ces simulations est qu'elles permettent d'avoir une couverture temporelle plus longue (tout en couvrant une zone sensiblement plus grande que celle où se trouvent les trois bouées).

#### 3.1.2.i Simulation Homere

Les simulations HOMERE ont été réalisées par les équipes de l'IFREMER dans le but de décrire les états de mer dans le Golfe de Gascogne. Deux versions ont été proposées pour couvrir la période 1994-2012 puis la période 2012-2016. Les séries temporelles ont été simulées grâce au code de calcul WAVEWATCH III qui utilise un schéma de propagation sur grille non structurée. Le paramétrage est celui proposé lors du projet de recherche IOWAGA (Integrated Oceans WAVes Geophysical

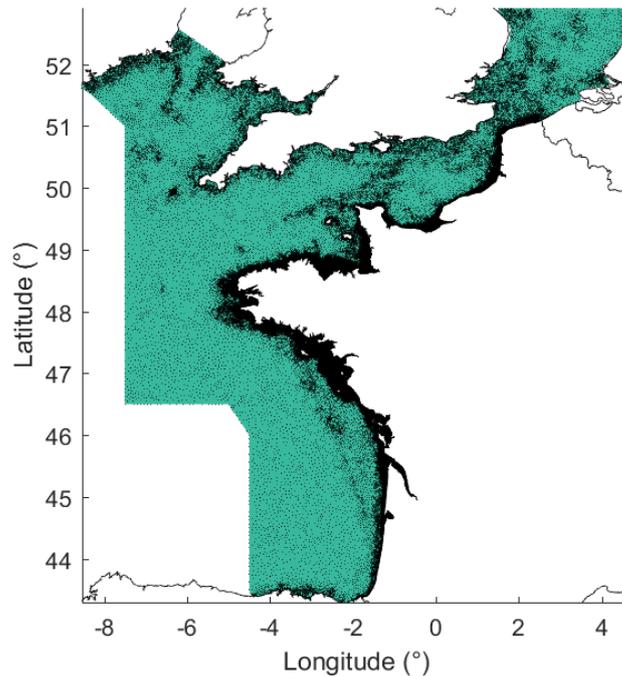


FIGURE 3.2 – Domaine couvert par le maillage du modèle HOMERE.

and other Applications). Le détail des paramètres utilisés est décrit dans le rapport de ce projet [11] et ne sera pas présenté ici. La bathymétrie provient des travaux du SHOM et de l'IFREMER (voir [5]). Les champs de vents sont issus des réanalyses CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) décrites par Saha [26]. Enfin, les courants et niveaux d'eau ont été calculés par le modèle hydrodynamique MARS 2D de l'IFREMER (voir [1] et [49]). La figure 3.2 montre la grille de points utilisée pour faire tourner cette simulation.

Dans la suite du document, les séries temporelles issues de la simulation HOMERE seront préfixées par **HOM**. Par exemple, **HOM.ANG** désignera la série temporelle d'états de mers simulés correspondant au lieu où se situe la bouée d'Anglet. Il faut tout de même noter qu'au moment où ce document est rédigé, nous n'avons pas accès à l'intégralité des données issues de la simulation Homere. Des variables comme  $T_p$  n'ont pas pu être extraites. De plus le recouvrement temporel avec la bouée de Saint-Jean-de-Luz n'est pas suffisant pour que les données soient exploitées pour ce point.

### 3.1.2.ii Simulation WWMII

La deuxième simulation utilisée dans ce travail sera appelée WWMII (pour les raisons données ci-après) et couvre la période 1949-2015. Les séries temporelles d'états de mer correspondantes sont obtenues grâce à un modèle couplé entre un modèle de circulation 2D horizontal basé sur Selfe [67] et sur le modèle spectral de vagues Wave Wind Model II [66]. Le modèle est ainsi forcé par les vents et pressions de la réanalyse NCEP/NCAR [22]. La simulation est réalisée sur le maillage de la figure 3.3. À noter que les champs de vent utilisés dans le modèle WWMII sont de

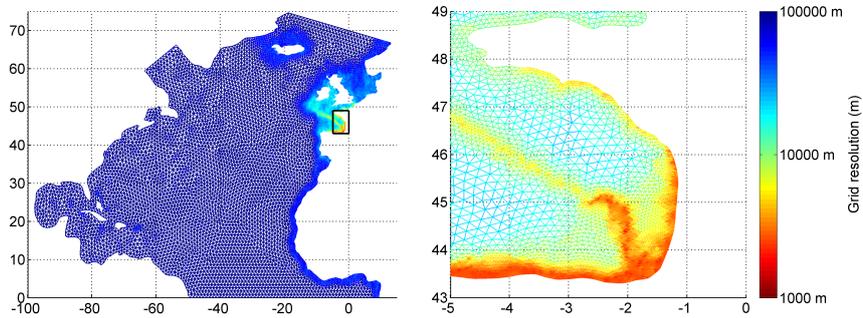


FIGURE 3.3 – Maillage utilisé pour la simulation WWMII. La figure de gauche montre la zone de l’Océan Atlantique concernée et la figure de droite montre le zoom sur le domaine correspondant au Golfe de Gascogne. L’échelle de couleur décrit la taille des mailles utilisées dans chaque secteur du domaine [66].

qualité homogène sur toute la durée de simulation [66].

Les séries temporelles d’états de mer (restreints aux vagues) issues de cette simulation seront préfixées par le symbole **WWMII**. Par exemple, **WWMII.SJL** désignera les séries correspondant au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz.

### 3.1.2.iii Caractéristiques spatiales et temporelles des simulations

Simulation	HOMERE	WWMII
Date début	09/11/1989 18 :00	01/11/1949 00 :00
Date fin	31/12/2016 23 :00	31/12/2014 00 :00

TABEAU 3.2 – Tableau résumant les caractéristiques temporelles des deux simulations utilisées.

Le tableau 3.2 et les figures 3.2 et 3.3 détaillent les étendues spatiales et temporelles des deux modèles de simulation. Pour chaque simulation, les données de sortie sont des séries temporelles d’états de mer (restreints aux vagues) correspondants donnant l’évolution de  $H_s$ ,  $T_p$ , etc, au cours du temps avec un pas de temps de trois heures sur toute la durée de simulation pour chaque point du maillage.

### 3.1.2.iv Biais des simulations

Un inconvénient possible de ces séries temporelles simulées est leur possible biais. En effet, pour réaliser une simulation numérique reproduisant le mouvement des vagues sur une longue période de temps, il faut une grande puissance de calcul. Pour avoir des temps de calculs raisonnables, un compromis en termes de maillage est généralement imposé. Cela peut ainsi conduire à des baisses de qualité des simulations dans certaines situations. D'autre part, il n'est pas certain que les schémas numériques utilisés ne dégradent pas également parfois la précision de la solution ou de manière plus drastique que les équations utilisées (théorie linéaire des vagues. . .) permettent une description fidèle de la réalité. Par exemple, comme nous le verrons dans le chapitre 4, les simulations numériques semblent avoir tendance à sous-estimer les hauteurs des vagues durant les événements extrêmes. Il sera néanmoins possible d'utiliser les états de mer réellement observés issus des mesures houlographiques pour corriger les séries temporelles simulées. Ces méthodes seront présentées au chapitre 4.

## 3.2 Séries temporelles de niveaux d'eau

Comme cela a été évoqué dans la section 2.4.2, en plus de l'intensité des vagues, il est naturel de tenir compte du niveau d'eau pour étudier les événements de submersion. L'objectif de cette section est d'expliquer comment, en un lieu fixé, le niveau d'eau moyen caractérisant un état de mer peut être calculé.

Comme pour les vagues, nous allons d'abord faire le point sur les données existantes issues d'observations puis nous intéresser aux possibilités de réanalyse permettant d'obtenir des séries temporelles sans données manquantes adaptées à la durée de notre étude.

### 3.2.1 Marégraphes

Un marégraphe est un appareil utilisé pour obtenir des observations *in situ* du niveau d'eau. Différentes technologies (utilisant une échelle, un flotteur, un capteur acoustique ou un capteur de pression) existent. Quel que soit le principe sous-jacent, le signal est traité pour filtrer l'effet des vagues et ainsi obtenir une valeur qui correspond au niveau d'eau  $\eta_t$  au lieu considéré à un temps  $t$ .

Pour l'étude présentée dans ce document, les mesures des marégraphes de So-coa et de Boucau ont été utilisées. Comme le montre le tableau 3.3, les données d'observations marégraphiques existent depuis plus longtemps que les données d'observations houlographiques. Malheureusement, même si les périodes couvertes sont a priori compatibles avec notre étude, les séries temporelles disponibles ne sont pas directement exploitables à cause du fort pourcentage de données manquantes, conséquence de problèmes matériels inhérents à l'observation *in situ*. L'image de la figure 3.1 montre la position des marégraphes considérés dans cette étude.

Nom	Latitude	Longitude	Début campagne	Données manquantes (%)
Boucau	43.52732	-1.51483	22/05/1967	18.2
Socoa	43.39524	-1.68162	21/11/1942	42.7

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques des marégraphes et des mesures associées disponibles pour l'étude. Le pourcentage de données manquantes est également indiqué.

Dans la suite du document, les séries temporelles incomplètes de niveau d'eau des marégraphes de Saint-Jean de Luz/Socoa et Boucau seront désignées respectivement par **MAR.SOCOA** et **MAR.BOUCAU**. Les données des deux marégraphes sont homogènes, la différence entre les deux niveaux d'eau ne montre pas une variabilité spatiale significative. De plus, le marégraphe de Boucau présente des biais liés à sa présence dans l'embouchure de l'Adour. En effet, le débit du fleuve peut conduire à des changements dans la variable  $\eta$  qui ne sont pas induits par les mouvements océaniques que l'on souhaite mesurer.

### 3.2.2 Réanalyse

Afin d'obtenir des séries temporelles complètes de valeurs du niveau d'eau couvrant toute la durée de l'étude, une méthode de réanalyse est proposée dans cette section.

Nous considérons dans la suite un lieu fixé, par exemple celui où se trouve le marégraphe de Boucau. Notons  $T$  l'ensemble des dates (avec un pas de temps horaire) pour lesquelles nous souhaitons disposer de la valeur du niveau d'eau. L'ensemble  $T$  peut s'écrire comme  $T_1 \cup T_2$ , où  $T_1$  est l'ensemble des dates pour lesquelles une observation du niveau d'eau est disponible et  $T_2$  est l'ensemble des dates pour lesquelles l'observation du niveau d'eau est manquante. Nous allons expliquer comment estimer précisément le niveau d'eau  $\eta_t$  à une date  $t \in T_2$  à partir de la série temporelle  $(\eta_t)_{t \in T_1}$  issue d'observations et des valeurs de la pression atmosphérique au lieu considéré  $(p_t)_{t \in T}$ .

Au lieu choisi, la valeur  $\eta_t$  du niveau d'eau à la date  $t$  peut s'écrire comme la somme de trois termes (comme le montre la figure 2.5) :

$$\eta_t = M_t + Z_{0,t} + S_t, \quad (3.1)$$

où  $M_t$  est la variation du niveau d'eau liée à la marée,  $Z_{0,t}$  est le niveau d'eau moyen sur les 30 derniers jours et  $S_t$  est la valeur de la surcote liée à la pression atmosphérique  $p_t$ .

Pour estimer la série  $(\eta_t)_{t \in T_2}$ , nous allons ainsi successivement estimer les séries  $(M_t)_{t \in T_2}$ ,  $(Z_{0,t})_{t \in T_2}$  et  $(S_t)_{t \in T_2}$ .

**Estimation de  $(M_t)_{t \in T_2}$**  Pour estimer  $M_t$ , pour  $t \in T_2$ , nous avons utilisé une approche harmonique d'estimation des influences des astres terrestre, lunaire et solaire [47] implémentée dans le script python de [56]. Cette méthode utilise la série

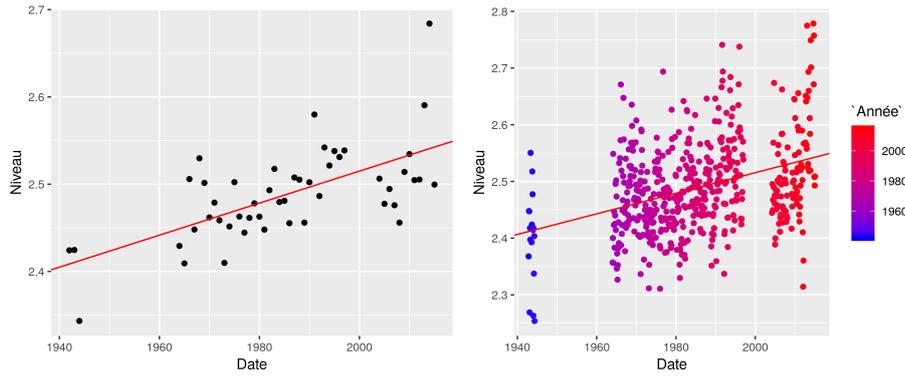


FIGURE 3.4 – Moyennes annuelles (à gauche) et mensuelles (à droite) du niveau d'eau en fonction du temps pour le marégraphe de Socca. Les droites rouges sont les régressions linéaires des niveaux d'eau en fonction du temps.

temporelle  $(\eta_t)_{t \in T_1}$ . Elle extrait les composants harmoniques de cette série de niveaux d'eau et fournit en résultats les variations autour d'une référence marégraphique. Dans le cadre de cette étude, la référence choisie est *Mean Lower Low Water* qui correspond à la moyenne des hauteurs de la marée la plus basse enregistrée chaque jour pendant la durée d'un cycle lunaire (19 ans).

Ainsi, à partir de la série observée  $(\eta_t)_{t \in T_1}$ , nous obtenons une estimation de la série  $(M_t)_{t \in T_2}$ .

**Estimation de  $(Z_{0,t})_{t \in T_2}$**  La figure 3.4 montre les moyennes de niveau d'eau annuelles et mensuelles. Les tendances linéaires sont ajoutées en rouge sur les graphiques. Sur les 75 ans d'observations, une augmentation est constatée. On propose de modéliser celle-ci via une régression linéaire simple entre le niveau d'eau  $Z_{0,t}$  et le temps  $t$ ,  $Z_{0,t} = t \times A_1 + B_1$ , avec  $A_1$  et  $B_1$  les coefficients issues de la régression linéaire. Sur la figure de droite, une variation saisonnière est également observée. En effet d'un mois à l'autre le niveau moyen varie sensiblement. Pour calculer  $(Z_{0,t})_{t \in T_2}$ , deux choix sont alors possibles. Si la valeur manquante se situe dans un mois  $m$  où des données existent en quantité suffisante (un mois à 60% de données sera considéré suffisant),  $Z_{0,t}$  sera égal à  $\bar{Z}_{0,m}$ , la moyenne des niveaux d'eau du mois  $m$  en cours. Sinon la régression linéaire entre le niveau d'eau et le temps représentée par les droites rouges du graphique sera utilisée  $Z_{0,t} = t \times A_1 + B_1$ .

Ainsi, à partir de la série observée  $(\eta_t)_{t \in T_1}$ , nous obtenons une estimation précise de la série  $(Z_{0,t})_{t \in T_2}$ .

**Estimation de  $(S_t)_{t \in T_2}$**  Une exploration des données de pression atmosphérique provenant du NCEP *National Centers for Environmental Prediction* [22], l'agence américaine dont la mission est de centraliser les données environnementales pour la prévision météorologique, est réalisée. La pression atmosphérique est obtenue avec un pas de temps de six heures, une interpolation linéaire pour récupérer toutes les données de pression est donc nécessaire. La figure 3.5 montre le lien entre la

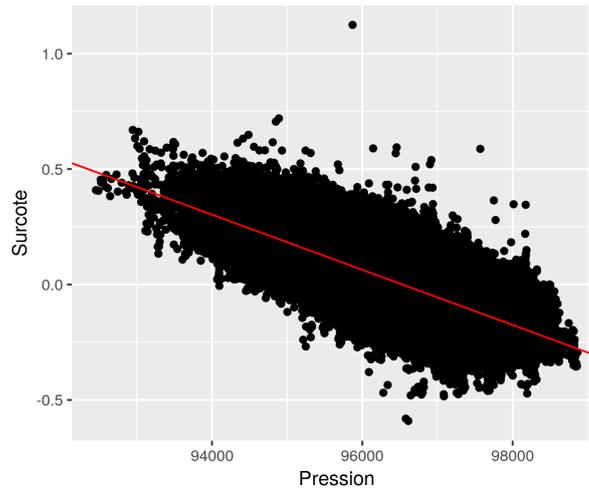


FIGURE 3.5 – Surcote (en m) en fonction de la pression (en  $P_a$ ) pour le point du marégraphe de Socoa. La tendance rouge est la régression linéaire simple entre les deux variables.

pression atmosphérique et la surcote à une même date  $t \in T_1$ . La surcote est obtenue par le calcul  $S_t = \eta_t - (Z_{0,t} + M_t)$ , avec la série de niveaux d'eau mesurées  $(\eta_t)_{t \in T_1}$  et les valeurs  $Z_{0,t}$  et  $M_t$  obtenues lors des paragraphes précédents (toujours pour  $t \in T_1$ ). La figure 3.5 suggère l'utilisation d'un baromètre inverse via une régression linéaire  $S_t = A_2 \times p_t + B_2$ , où  $A_2$  et  $B_2$  sont les coefficients obtenus via la régression linéaire. Les données  $(S_t)_{t \in T_2}$  seront obtenues en appliquant cette régression linéaire grâce à  $(p_t)_{t \in T_2}$ .

Ainsi, à partir des séries observées  $(\eta_t)_{t \in T_1}$  et  $(p_t)_{t \in T}$ , nous avons été en mesure d'obtenir une estimation de la série  $(S_t)_{t \in T_2}$ .

Il est naturel de s'interroger sur la précision de l'estimation de la série temporelle  $(\eta_t)_{t \in T_2}$  obtenue par la méthode ci-dessus. Nous reviendrons sur cet aspect dans le chapitre 4.

En effet, plusieurs biais peuvent être notés. Le terme  $Z_{0,t}$  est un modèle très simpliste des variations saisonnières et de l'évolution globale du niveau de la mer due au changement climatique. Ensuite, l'évaluation de la surcote est aussi simplifiée et n'utilise que la pression atmosphérique. Enfin, les variations locales dues aux vagues et aux courants notamment ne sont pas comptabilisés ici. En revanche, dans le cadre d'une étude comme celle-ci et étant donnés les résultats qui seront présentés dans la section 4.2.3, cette réanalyse apporte des données complètes tout à fait satisfaisantes.

À titre de comparaison, la formule (3.2) calcule le niveau d'eau sans tenir compte de la surcote et du changement climatique.

$$\eta(t) = Z_0 + M_t \quad (3.2)$$

avec  $Z_0$  la moyenne de l'ensemble des mesures d'un marégraphe.

Dans la suite du document, ces jeux de données calculés par la formule (3.1) seront référencés par les symboles **C1.BOUCAU** et **C1.SOCCA**. Les jeux de données provenant quant à eux de la formule (3.2) seront notés **C2.BOUCAU** et **C2.SOCCA**.

Du point de vue de la qualité des données, la formule (3.1) ne prend pas en compte la surcote liée au vent. En effet, dans un environnement comme le Pays Basque, cette composante est négligeable compte tenu de la configuration de la bathymétrie. Cependant, ce type de méthode ne pourra pas être appliqué en d'autres lieux comme le pertuis charentais [66]. De plus, cette formulation ne prend pas en compte toutes les variations saisonnières existantes pour le niveau d'eau (crues, températures...).

### 3.3 Format des données

Nous avons présenté ci-dessus les différentes sources de données. À partir des données observées et des réanalyses, nous avons été en mesure d'obtenir, pour plusieurs lieux d'intérêt de la côte basque, des séries temporelles horaires complètes de variables caractérisant les états de mer sur toute la période d'étude considérée (approximativement de 1950 à nos jours). À partir de ces séries temporelles caractérisant l'évolution de l'état de la mer, il est possible de calculer les variables transformées introduites dans la section 2.4.3 comme le run-up  $R_{2\%}$  défini dans (2.7) et le flux d'énergie des vagues local  $P$  défini par (2.6). Pour un lieu donné et pour un intervalle de temps  $[t_{min}, t_{max}]$ , la série temporelle multivariée disponible pour notre étude peut être résumée par le tableau 3.4. Il faut noter que les valeurs au point du marégraphe de Socoa seront les seules utilisées. En effet, la variabilité le long de la côte basque est négligeable pour la variable  $\eta_t$ . Cette variable est donc considérée comme suffisamment homogène le long de la côte basque française pour être significative en tout endroit.

Date $t$	$H_s$	$T_{m10}$	$T_p$	$\eta_t$	$R_{2\%}$	$R_W$	$R_L$	$P$	$\theta_m$
$t_0$									
...									
$t_f$									

TABLEAU 3.4 – Exemple de tableau final pour un jeu de données (mesuré ou simulé) correspondant à un point (une bouée par exemple).

Compte tenu des possibilités accordées par les simulations numériques et les méthodes de calcul du niveau d'eau, il est possible d'obtenir des jeux de données homogènes sur la durée d'étude et suffisamment complets pour faire une analyse comparée avec les données de dégâts existantes sur des zones étudiées. Néanmoins la réalité n'étant pas nécessairement bien représentée par les modèles, une série d'outils de validation et de correction sera présentée au chapitre suivant. Les résultats de l'utilisation de ces méthodes sur les jeux de données disponibles ici y seront détaillés. Cela aura pour conséquence de permettre de proposer des jeux de don-

nées représentatifs de la réalité dont les biais seront connus et donc pour lesquels une bonne confiance sera accordée.

# Chapitre 4

## Validation et correction des séries temporelles d'états de mer et de niveaux d'eau

### Sommaire

---

<b>4.1 Outils statistiques pour la comparaison de séries temporelles . . .</b>	<b>36</b>
4.1.1 Comparaison de deux séries temporelles à dates communes	36
4.1.2 Comparaison de deux séries temporelles à dates non nécessairement communes . . . . .	37
4.1.3 Correction d'une série temporelle à partir d'une autre . . . . .	38
<b>4.2 Comparaisons des simulations avec des observations <i>in situ</i> . . .</b>	<b>39</b>
4.2.1 Au point de la bouée d'Anglet . . . . .	39
4.2.2 Au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz . . . . .	44
4.2.3 Au point du marégraphe de Socoa . . . . .	45
<b>4.3 Séries temporelles corrigées en distribution . . . . .</b>	<b>47</b>

---

Dans le chapitre 2, nous avons introduits les variables, appelées *variables d'aléa*, pertinentes pour étudier les évènements de submersion. Dans le chapitre 3, les différents jeux de données océaniques disponibles pour l'étude considérée ont été présentés. Avant de discuter, dans le chapitre suivant, de dégâts à la côte que les évènements de submersion peuvent occasionner, des outils de validation et de correction des données seront décrits dans ce chapitre. Ces outils seront ensuite utilisés pour valider ou corriger les séries temporelles d'états de mer et de niveaux d'eau décrites dans le chapitre précédent. L'étape de validation consiste à vérifier que les séries temporelles disponibles (essentiellement issues de simulations numériques) de variables comme  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\eta$ , . . . , ont des caractéristiques statistiques proches de séries d'observations *in situ*. En cas de biais important, nous expliquerons comment procéder à une correction fondée sur une version empirique de la *transformation en probabilité* et de la *transformation quantile*.

La première section de ce chapitre est consacrée à la présentation des outils statistiques nécessaires à la validation et l'éventuelle correction des séries tempo-

relles. La section suivante décrit l'utilisation de ces outils pour comparer les séries issues de simulations numériques avec des séries d'observations *in situ*. Enfin, la dernière section consiste en une présentation des séries temporelles de variables d'aléa éventuellement corrigées retenues pour l'étude.

Notons que le contenu de ce chapitre a donné lieu à une publication dans le *Journal of Coastal Research* lors de la conférence "International Coastal Symposium" (ICS 2018) à Busan, Corée du Sud, en mai 2018. L'article publié est disponible en annexe pages 112 à 118.

## 4.1 Outils statistiques pour la comparaison de séries temporelles

Nous considérons dans cette partie deux séries temporelles univariées  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  qui peuvent, par exemple, respectivement correspondre à des observations *in situ* et à des simulations numériques au même lieu. Dans la première section, nous expliquons comment ces deux séries peuvent être comparées lorsque les ensembles de dates  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$  sont identiques. Dans la deuxième section, nous nous intéressons au cas plus général où  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$  ne sont pas nécessairement identiques. Enfin, dans la dernière section, nous présentons une méthode de correction d'une série temporelle à partir d'une autre afin que la première puisse récupérer certaines caractéristiques statistiques de la seconde. Le lecteur pourra se rapporter au livre de Saporta [32] pour plus de détails.

### 4.1.1 Comparaison de deux séries temporelles à dates communes

L'outil le plus simple pour comparer  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  lorsque  $\mathcal{T}_1 = \mathcal{T}_2$  est graphique. Il s'agit du nuage de points  $\{(x_t, y_t) : t \in \mathcal{T}_1\}$ . Plus les points  $(x_t, y_t)$ ,  $t \in \mathcal{T}_1$ , sont concentrés autour de la droite d'équation  $y = x$ , plus les deux séries temporelles sont similaires.

Cette similarité peut également être évaluée à l'aide de plusieurs indicateurs numériques. Notons  $\mathcal{T}_1 = \{t_1, \dots, t_n\}$ . La différence, en moyenne, entre  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$ , peut être évaluée par la formule

$$\text{Biais}[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}] = \frac{1}{n} \sum_{t=t_1}^{t_n} (x_t - y_t),$$

laquelle, lorsque  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  représente des observations *in situ* et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  des simulations correspondantes, peut s'interpréter comme le *biais* de simulation, c'est-à-dire, l'erreur moyenne faite par la simulation considérée. Cette quantité mesure la tendance globale des valeurs simulées à sur- ou sous-estimer la grandeur réelle. Une valeur de zéro (resp. positive, négative) s'interprète comme l'absence d'erreur en moyenne (resp. une sous-estimation, sur-estimation) de la réalité, en moyenne.

Il est également possible de normaliser le biais en calculant le biais en pourcentage comme suit :

$$\text{Biais}_{\%}[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}] = \frac{\text{Biais}[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}]}{\frac{1}{n} \sum_{t=t_1}^{t_n} x_t} \times 100 = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\bar{x}} \times 100.$$

L'erreur de simulation peut être évaluée par la racine de l'erreur quadratique moyenne :

$$\text{RMSE}[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=t_1}^{t_n} (x_t - y_t)^2}.$$

C'est une mesure de précision mélangeant l'erreur moyenne et la variation au sein des erreurs individuelles. Notons que cette mesure est plutôt sensible aux valeurs aberrantes.

En complément des indicateurs précédents, il est d'usage de calculer également le coefficient de détermination :

$$R^2[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}] = \text{Corr}[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}]^2$$

où  $\text{Corr}[(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}, (y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}]$  est le coefficient de corrélation linéaire entre les deux séries. Cette quantité mesure la force de l'association linéaire entre  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$ . Plus les points  $(x_t, y_t)$ ,  $t \in \mathcal{T}_1$ , se concentrent sur une droite (pas nécessairement, la droite d'équation  $y = x$ ), plus le  $R^2$  sera proche de 1. En cas de biais nul, le  $R^2$  pourra être interprété comme le degré de concentration autour de la droite d'équation  $y = x$ .

#### 4.1.2 Comparaison de deux séries temporelles à dates non nécessairement communes

Dans le cas où les ensembles de dates  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$  ne sont pas nécessairement identiques, les deux séries  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  peuvent être comparées en terme de distribution. En supposant que  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  sont des réalisations de séries temporelles *stationnaires*, une première approche consiste à comparer les fonctions de répartitions empiriques correspondantes :

$$\hat{F}_x(z) = \frac{1}{|\mathcal{T}_1|} \sum_{t \in \mathcal{T}_1} \mathbf{1}(x_t \leq z) \quad \text{et} \quad \hat{F}_y(z) = \frac{1}{|\mathcal{T}_2|} \sum_{t \in \mathcal{T}_2} \mathbf{1}(y_t \leq z), \quad z \in \mathbb{R}, \quad (4.1)$$

où  $|\mathcal{T}_1|$  et  $|\mathcal{T}_2|$  désignent les cardinaux des ensembles  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$ , respectivement. Pour tout  $z \in \mathbb{R}$ ,  $\hat{F}_x(z)$  (resp.  $\hat{F}_y(z)$ ) correspond simplement à la proportion de  $x_t$ ,  $t \in \mathcal{T}_1$  (resp.  $y_t$ ,  $t \in \mathcal{T}_2$ ) inférieurs à  $z$ . Il s'agit ainsi, sous l'hypothèse de stationnarité mentionnée précédemment, d'une estimation que le phénomène aléatoire sous-jacent prenne une valeur inférieure à  $z$ .

La stationnarité d'une série temporelle est une propriété stipulant que la distribution de la variable considérée ne change pas en fonction du temps. Sous une hypothèse de continuité supplémentaire sur la distribution du phénomène aléatoire sous-jacent, il est possible de comparer des estimations de densités à la place d'estimations de fonctions de répartition. Il s'agira par exemple de comparer des *estimations à noyaux* des densités sous-jacentes :

$$\hat{f}_x(z) = \frac{1}{h|\mathcal{T}_1|} \sum_{t \in \mathcal{T}_1} \mathsf{K}\left(\frac{z - x_t}{h}\right) \quad \text{et} \quad \hat{f}_y(z) = \frac{1}{h|\mathcal{T}_2|} \sum_{t \in \mathcal{T}_2} \mathsf{K}\left(\frac{z - y_t}{h}\right), \quad (4.2)$$

où  $h \geq 0$  est la largeur de la *fenêtre* spécifiant le degré de lissage de la densité estimée et  $\mathsf{K}$  est un *noyau*. Un choix usuel est le noyau Gaussien donné par :

$$\mathsf{K}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}, \quad z \in \mathbb{R}.$$

Dans la pratique, les fonctions quantiles estimées  $\hat{F}_x^{-1}$  et  $\hat{F}_y^{-1}$  seront également utilisées. Pour une proportion  $p$  donnée, un quantile d'ordre  $p$  peut ainsi être calculé par  $\hat{F}_x^{-1}(p) = q_{xp}$  pour la série  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  (resp.  $\hat{F}_y^{-1}(p) = q_{yp}$  pour la série  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$ ). À partir d'un vecteur de proportions  $(p_i)$  et grâce aux fonctions  $\hat{F}_x^{-1}$  et  $\hat{F}_y^{-1}$ , il est ainsi possible d'obtenir deux séries de quantiles correspondants aux séries  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$ . La représentation graphique par diagramme quantiles-quantiles permet de comparer graphiquement les quantiles de deux séries. L'égalité en distribution des deux séries temporelles correspond à la situation où les points du diagramme quantiles-quantiles sont, approximativement, sur la droite  $y = x$ .

Les outils décrits ci-dessus peuvent tous être implémentés à l'aide du langage de programmation R [65], lequel permet également aisément les représentations graphiques correspondantes, comme les diagrammes quantiles-quantiles ou les densités estimées données dans (4.2).

### 4.1.3 Correction d'une série temporelle à partir d'une autre

Si les étapes précédentes mettent en valeur une différence entre les distributions stationnaires des séries  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$  et  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$ , il est possible de corriger une série à partir de l'autre en utilisant des versions empiriques de la *transformation en probabilité* et de la *transformation quantile*.

Soit  $X$  une variable aléatoire de fonction de répartition  $F_X$ , donnée par  $F_X(z) = \Pr(X \leq z)$ ,  $z \in \mathbb{R}$ . Si  $F_X$  est continue, alors la *transformation en probabilité* nous indique que la variable aléatoire  $F_X(X)$  suit une loi uniforme sur l'intervalle  $]0, 1[$ .

Soit  $F_X^{-1}$  la fonction quantile de  $X$  (qui est simplement l'inverse de  $F_X$  si  $F_X$  est continue strictement croissante) et soit  $U$  une variable aléatoire uniforme sur l'intervalle  $]0, 1[$ . La *transformation quantile* nous indique alors que la variable aléatoire  $F_X^{-1}(U)$  a alors  $F_X$  pour fonction de répartition.

Des versions empiriques de ces transformations peuvent être utilisées par exemple pour corriger une série temporelle de simulations  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  à partir d'observations *in situ*  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$ . La première étape consiste à calculer les fonctions de répartition  $\hat{F}_x$  et  $\hat{F}_y$  données par (4.1). La version corrigée de  $(y_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  est alors  $(\tilde{y}_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$ , où

$$\tilde{y}_t = F_x^{-1}(F_y(y_t)), \quad t \in \mathcal{T}_2. \quad (4.3)$$

La série temporelle résultante  $(\tilde{y}_t)_{t \in \mathcal{T}_2}$  aura alors approximativement la même distribution stationnaire que la série  $(x_t)_{t \in \mathcal{T}_1}$ .

## 4.2 Comparaisons des simulations avec des observations *in situ*

À l'aide des outils présentés dans la section précédente, nous pouvons évaluer l'adéquation entre les séries simulées disponibles et des observations *in situ* en certains lieux. Nous considérons ainsi successivement les points correspondants aux bouées d'Anglet et de Saint-Jean-de-Luz pour les séries d'états de mer ainsi que le point du marégraphe de Socoa pour les données de niveaux d'eau. Cette comparaison entraînera, en cas de détection de biais de simulation, la correction des séries temporelles issues des simulations afin de permettre une analyse des dommages plus pertinentes dans le dernier chapitre.

### 4.2.1 Au point de la bouée d'Anglet

Le point correspondant à la bouée d'Anglet est situé à environ cinq kilomètres de la côte, en face du phare de Biarritz. Les séries temporelles d'états de mer, appelées **BOUEE.ANG** et **WWMIL.ANG** d'une part, et **BOUEE.ANG** et **HOM.ANG** d'autre part, seront comparées dans cette section. Rappelons que **BOUEE.ANG** fait référence à des observations d'états de mer *in situ* au point de la bouée d'Anglet et que les séries temporelles **WWMIL.ANG** et **HOM.ANG** font référence aux simulations numériques décrites dans les sections 3.1.2.ii et 3.1.2.i, respectivement, restreintes au point de la bouée d'Anglet. Le point de la bouée d'Anglet étant situé à une profondeur de 50 mètres, cette valeur sera utilisée pour le calcul du flux P défini par la formule (2.6). Pour le Runup  $R_{2\%}$  défini par (2.7), la valeur de la pente  $\beta$  a été prise égale à 0.007%. Cette valeur correspond en fait à la mesure de la pente de la Grande Plage de Biarritz obtenue entre l'hiver 2017 et l'hiver 2019 [15]. Bien qu'il soit peu probable que cette valeur soit constante au cours du temps, elle sera néanmoins utilisée pour les trois jeux de données considérés dans cette section.

Les comparaisons entre valeurs simulées et observées au point de la bouée d'Anglet ont été effectuées pour les variables  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{m10}$ , P et  $R_{2\%}$  introduites dans la section 2.4. Le tableau 4.1 donne les statistiques descriptives pour chacune de ces variables et les trois jeux de données considérés. Le tableau 4.2 fournit les indicateurs présentés dans la section 4.1.1. Une inspection du tableau 4.1 suggère que les

CHAPITRE 4. VALIDATION ET CORRECTION DES SÉRIES TEMPORELLES  
D'ÉTATS DE MER ET DE NIVEAUX D'EAU

Var.	BOUEE.ANG			WWMII.ANG			HOM.ANG		
	Min.	Max	Moy.	Min.	Max	Moy.	Min.	Max	Moy.
$H_s$	0.13	8.9	1.732	0.097	8.754	1.546	0.148	9.264	1.609
$T_p$	2.11	21.90	10.54	2.807	20.994	10.788	X	X	X
$T_{m10}$	3.2	18.10	8.987	2.383	17.196	9.359	2.430	16.690	9.219
P	0.064	678.573	24.406	0.019	322.951	15.945	0.055	624.096	19.475
$R_{2\%}$	0.092	4.806	1.136	0.091	4.938	1.206	X	X	X
$\theta_m$	0.0	360.0	305.7	226.4	344.8	303.2	0.0	360.0	304.0

TABLEAU 4.1 – Résumés statistiques des séries temporelles d'états de mer disponibles au point de la bouée d'Anglet.

Simu.	WWMII.ANG				HOM.ANG			
	Biais	Biais (%)	RMSE	$R^2$	Biais	Biais (%)	RMSE	$R^2$
$H_s$	0.112	6.524	0.484	0.730	0.075	4.625	0.302	0.846
$T_{m10}$	-0.314	-3.512	3.027	0.014	-0.465	-5.282	1.077	0.788
P	7.494	31.019	27.737	0.370	2.789	14.106	13.743	0.648
$\theta_m$	2.678	0.877	19.064	0.094	2.032	0.664	17.408	0.271

TABLEAU 4.2 – Biais de simulation absolu et en pourcentage, racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour les simulations WWMII et Homere au point de la bouée d'Anglet pour les variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$  et P.

ordres de grandeurs pour les variables  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{m10}$  et  $R_{2\%}$  sont globalement comparables d'un jeu de données à l'autre, ce qui semble indiquer que les plages des valeurs simulées sont relativement réalistes. En ce qui concerne le flux P, on constate néanmoins qu'il est clairement sous-estimé, en moyenne, dans la simulation WWMII. Ce dernier point est confirmé par le tableau 4.2 qui montre un biais de simulation très important pour le flux P, en particulier pour la simulation WWMII qui a ainsi tendance à très fortement sous-estimer le flux en moyenne.

Les panneaux de gauche des figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 montrent les diagrammes quantiles-quantiles obtenus en comparant les valeurs simulées et observées de  $H_s$ ,  $T_{m10}$ , P et  $R_{2\%}$ , respectivement. Ces diagrammes ont été réalisés comme décrit dans la section 4.1.2. Les panneaux de droite de ces mêmes figures donnent les densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations.

Pour chacune des variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$ , P et  $R_{2\%}$ , les densités estimées à partir d'observations et de simulations semblent relativement proches. Ce sont les diagrammes quantiles-quantiles qui sont les plus informatifs et révèlent globalement une tendance des simulations à sous-estimer les quantiles modérés à élevés des quatre variables considérées. En inspectant la figure 4.1, on observe clairement que  $H_s$  est sous-estimée pour des hauteurs significatives de vagues supérieures à 2.5 m. Sans surprise au vue de la formule (2.6), la sous-estimation du flux P est encore plus marquée dans la figure 4.3 car  $H_s$  intervient au carré dans le calcul de P. La simulation WWMII est particulièrement affectée avec des quantiles simulés approximativement 50% inférieurs aux quantiles observés lorsque  $P > 200 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . La sous-estimation du flux P par les simulations est également illustrée dans la figure 4.3 où

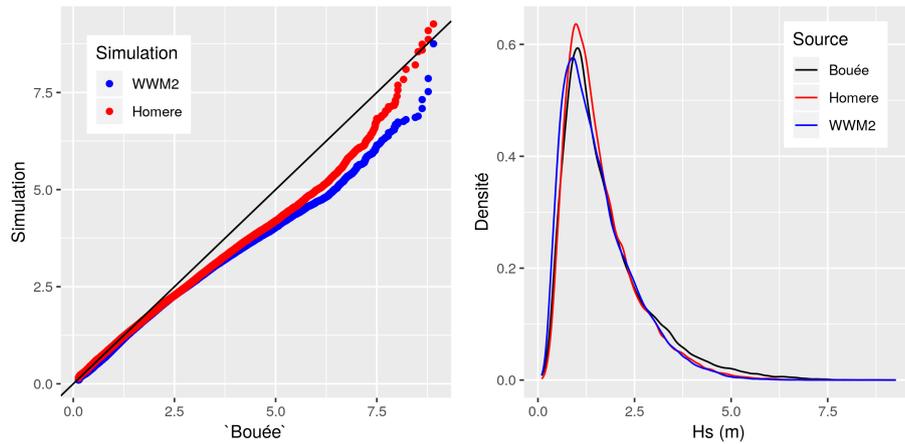


FIGURE 4.1 – Diagramme quantiles-quantiles pour  $H_s$  (en  $m$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite).

un zoom a été effectué sur les densités estimées du flux entre  $300 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Par exemple, pour la simulation WWMII, la densité estimée devient nulle à partir de  $340 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , alors que la densité estimée des valeurs observées apparaît comme clairement non nulle au moins jusqu'à  $P = 400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . En ce qui concerne la période  $T_{m10}$ , on constate à partir de la figure 4.2 que l'adéquation entre valeurs observées et simulées est bien meilleure, même si les périodes faibles sont globalement légèrement sur-estimées et les périodes élevées sont globalement légèrement sous-estimées. Enfin, à partir de la figure 4.4, on constate la relative bonne adéquation entre quantiles observés et simulés du Runup  $R_{2\%}$  pour la simulation WWMII. Rappelons que le Runup  $R_{2\%}$  n'a pas pu être calculé pour la simulation Homere car cette dernière ne contient pas la valeur de la période pic  $T_p$ .

En conclusion, au point de la bouée d'Anglet, même si certaines variables semblent être correctement simulées, la plupart des variables sont sous-estimées, et parfois, très fortement. Les biais de simulation, correspondant aux grandes vagues notamment, nous incitent à tenter d'utiliser la méthode de correction fondée sur les transformations en probabilité et quantile présentée dans la section 4.1.3. Plusieurs essais de telles corrections seront décrits dans la section 4.3.

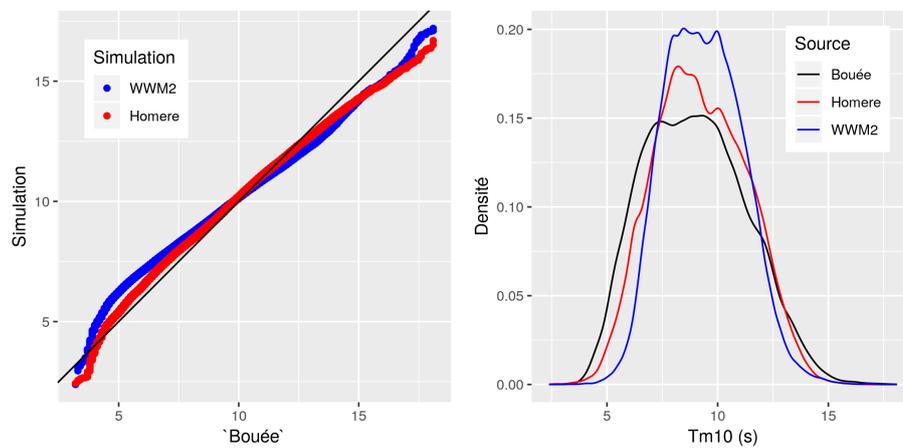


FIGURE 4.2 – Diagramme quantiles-quantiles pour  $T_{m10}$  (en s) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite).

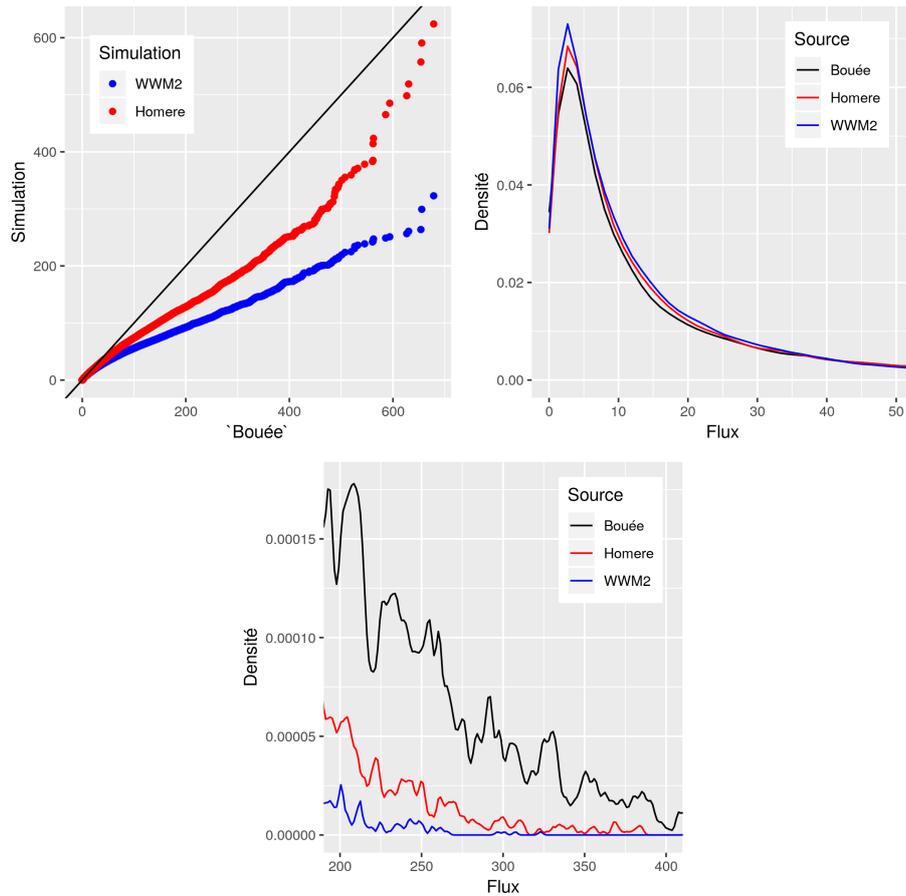


FIGURE 4.3 – Diagramme quantiles-quantiles pour  $P$  (en  $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). La figure du bas donne les densités estimées entre 300 et 400  $J.m^{-1}.s^{-1}$ .

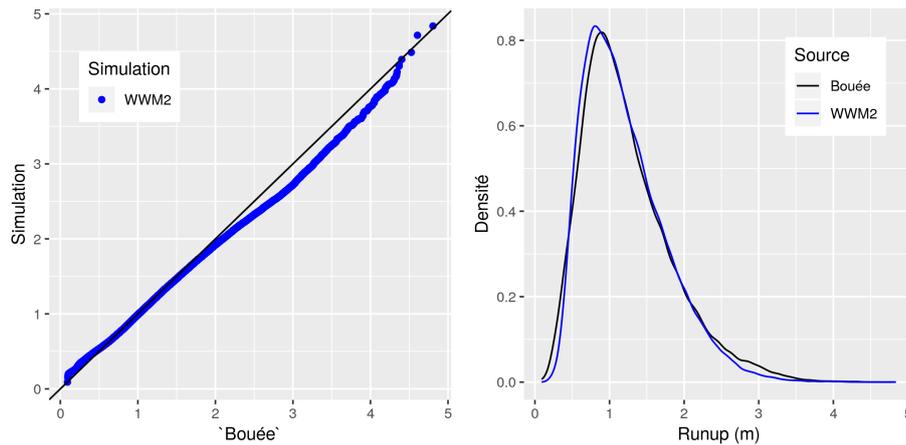


FIGURE 4.4 – Diagramme quantiles-quantiles pour  $R_{2\%}$  (en  $m$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite).

## 4.2.2 Au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz

La bouée de Saint-Jean-de-Luz est située face au port de la ville, quasiment en face de la digue de l'Artha et du fort de Socoa. Elle se situe à environ 2 kilomètres du littoral et est ancrée à une profondeur de 20 mètres. Nous rappelons que la simulation Homere ayant un très faible recouvrement temporel avec les données de la bouée, les données issues de cette simulation ne pourront pas être exploitées ici. Ainsi, seules les séries temporelles de la bouée et de la simulation WWMII seront comparées : il s'agit des jeux de données **BOUEE.SJL** et **WWMII.SJL** présentés dans la section 3.1. Étant donnée l'absence d'information sur les pentes de plages de la baie de Saint-Jean-de-Luz, nous n'avons accès à aucune valeur de pente de plage  $\beta$ , ce qui implique qu'aucun calcul de Runup ne sera envisagé dans cette section.

Pour le point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz, les séries temporelles observées et simulées par WWMII ont été comparées pour les variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$ ,  $T_p$  et le flux  $P$ . Dans le tableau 4.3, les statistiques descriptives de chacune des variables sont données pour **BOUEE.SJL** et **WWMII.SJL**. Dans le tableau 4.4, on retrouve les indicateurs présentés dans la section 4.1.1. De même que pour la bouée d'Anglet dans la section précédente, nous pouvons constater, à partir du tableau 4.3, que les ordres de grandeurs des variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$  et  $T_p$  sont plutôt comparables entre les observations et la simulation WWMII. En revanche, le flux  $P$  semble encore une fois largement sous-estimé. Cela est confirmé par l'inspection de la valeur du biais de simulation donné dans le tableau 4.4. Contrairement à la situation observée au point de la bouée d'Anglet, la variable  $H_s$  apparaît comme légèrement sur-estimée, en moyenne, par la simulation. Un tel résultat pourrait s'expliquer par la faible longueur des séries temporelles d'observations pour le point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (la bouée a été mise en service en avril 2013).

Les parties gauches des figures 4.5, 4.6 et 4.7 montrent les diagrammes quantiles-quantiles obtenus en comparant les valeurs d'observation et de simulation par WWMII pour  $H_s$ ,  $T_{m10}$  et le flux  $P$ . Les parties droites de ces figures correspondent aux densités estimées des valeurs observées et des valeurs de la simulation WWMII. Ces figures ont été réalisées comme expliqué dans la section 4.1.2.

En terme de diagrammes quantiles-quantiles, les résultats obtenus pour le point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz sont proches de ceux observés pour le point de la bouée d'Anglet. En effet, les vagues au dessus de 2.5 m semblent globalement sous-estimées par WWMII (même si, en moyenne, WWMII semble sur-estimer légèrement les hauteurs de vagues significatives). Pour la période  $T_{m10}$ , les périodes très faibles ainsi que les périodes supérieures à 10 s sont sous-estimées par le modèle. Entre ces deux valeurs, le modèle semble sur-estimer légèrement la période  $T_{m10}$ . Comme pour la bouée d'Anglet, la simulation WWMII sous-estime très fortement le flux  $P$ .

Les conclusions pour le point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz sont ainsi très proches de celles pour le point de la bouée d'Anglet. Malgré des ordres de grandeur corrects pour les variables, on constate une sous-estimation marquée des grandes vagues. Ces biais de simulation vont nous inciter à utiliser la méthode à base des

Variable	BOUEE.SJL			WWMII.SJL		
	Min.	Max	Moy.	Min.	Max	Moy.
$H_s$	0.140	8.560	1.611	0.097	9.246	1.601
$T_{m10}$	3.500	19.500	9.389	2.383	17.208	9.450
$T_p$	2.100	38.900	10.850	2.808	20.786	10.842
P	0.103	545.164	22.972	0.021	345.258	16.393

TABLEAU 4.3 – Résumés statistiques des séries temporelles d'états de mer disponibles au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz.

Simu.	WWMII.SJL			
	Variable	Biais	Biais (%)	RMSE
$H_s$	-0.108	-6.461	0.447	0.838
$T_{m10}$	0.163	1.758	3.443	0.067
$T_p$	-0.310	-2.899	1.867	0.645
P	5.917	23.312	23.463	0.477

TABLEAU 4.4 – Biais de simulation absolu et en pourcentage, racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour les simulations WWMII et Ho-mere au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz pour les variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$ ,  $T_p$  et P.

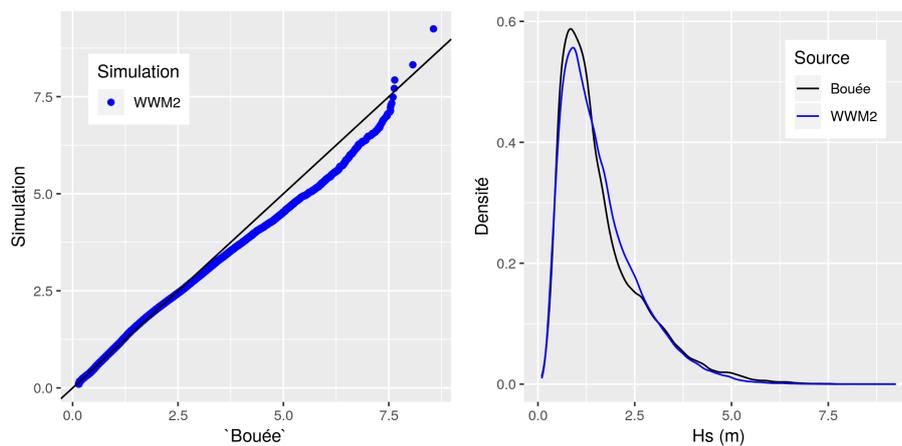


FIGURE 4.5 – Diagramme quantiles-quantiles pour  $H_s$  (en  $m$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite).

transformations en probabilité et quantile vues dans la section 4.1.3 pour corriger les séries temporelles simulées. Les essais de correction seront décrits dans la section 4.3.

### 4.2.3 Au point du marégraphe de Socoa

Pour l'étude des données de niveaux d'eau, seules les données issues du marégraphe de Socoa ont été utilisées. Les séries temporelles **C1.SOCOA** et **C2.SOCOA**

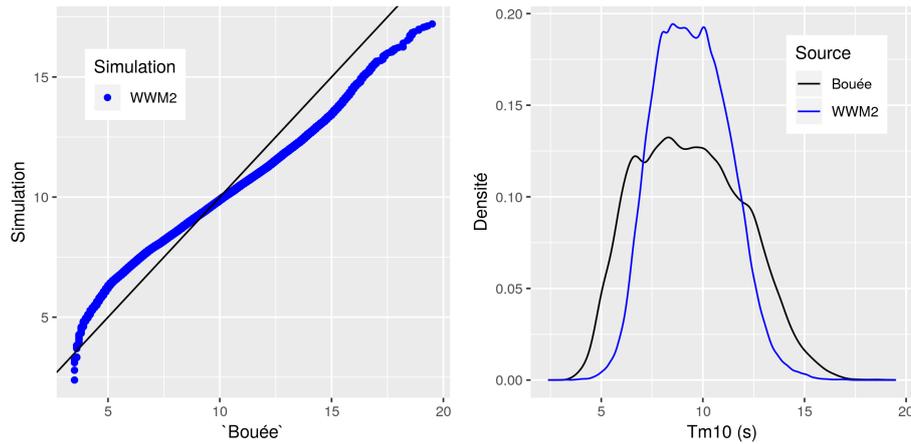


FIGURE 4.6 – Diagramme quantiles-quantiles pour  $T_{m10}$  (en s) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite).

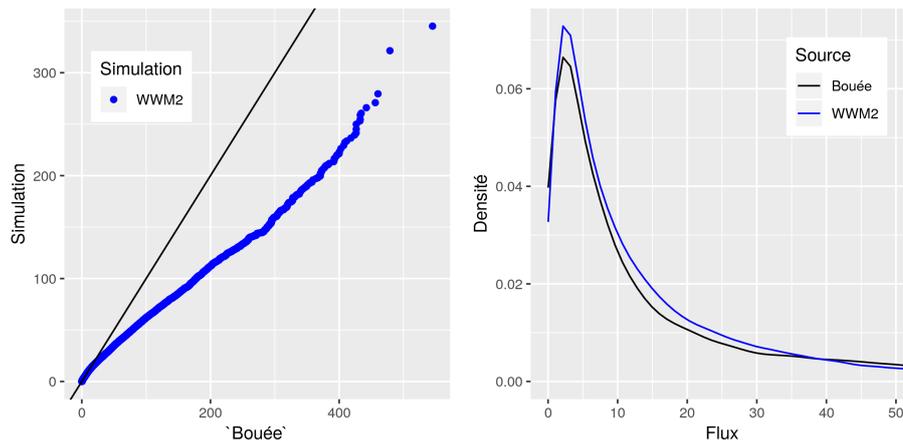


FIGURE 4.7 – Diagramme quantiles-quantiles pour le flux P (en  $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite).

de niveaux d'eau  $\eta$  calculées dans la section 3.2.2 ont été ainsi comparées à la série temporelle du marégraphe **MAR.SOCOA** présentée dans la section 3.2.1.

Les indicateurs vus à la section 4.1.1 ont été calculés pour comparer les données **MAR.SOCOA** mesurées par le marégraphe avec les jeux de données de réanalyse **C1.SOCOA** et **C2.SOCOA**. Les résultats sont consignés dans le tableau 4.5. Les indicateurs indiquent une très bonne proximité à la réalité pour les deux méthodes de calcul avec un léger avantage pour **C1.SOCOA** qui est calculé avec la formule (3.1).

À l'aide de la méthode de la section 4.1.2, les fonctions de densités ont été estimées pour les trois jeux de données et représentées sur la figure 4.8. De plus, un diagramme quantiles-quantiles a été réalisé. Sur les deux représentations, la proximité entre les distributions des réanalyses et du marégraphe est évidente, avec, encore

Stats	C1.SOCOA	C2.SOCOA
Biais	0.0	0.0
Biais (%)	0.0	0.019
RMSE	0.079	0.116
R <sup>2</sup>	0.993	0.985

TABLEAU 4.5 – Biais de simulation absolu et en pourcentage, racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) pour les simulations WWMII et Homere au point du marégraphe de Socoa pour la variable  $\eta$  (en  $m$ ).

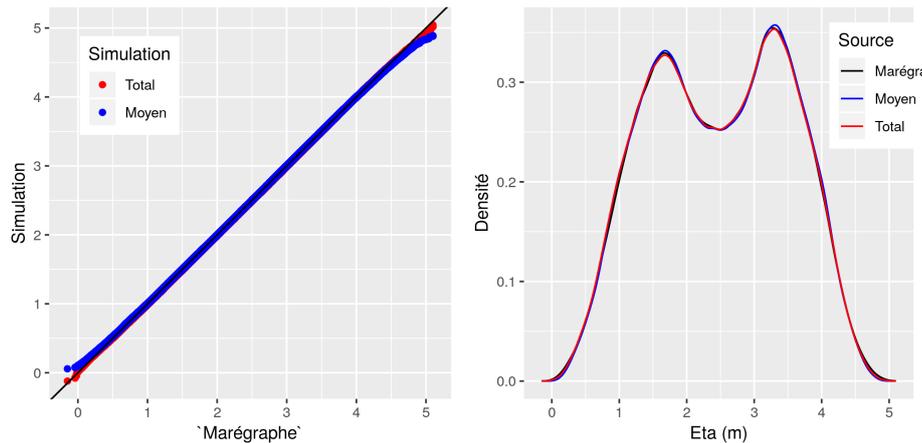


FIGURE 4.8 – Diagrammes quantiles-quantiles (à gauche) et fonctions de densités estimées (à droite) pour  $\eta$  (en  $m$ ) pour les données au point du marégraphe de Socoa.

une fois, un léger avantage pour **C1.SOCOA**.

Les données de réanalyses de niveaux d'eau établies à l'aide de la méthode présentée dans la section 3.2.2 montrent une grande proximité aux données du marégraphe. La série temporelle calculée **C1.SOCOA** apparaît comme la meilleure représentation de la réalité. La comparaison de la série temporelle du marégraphe avec **C2.SOCOA** a également permis de vérifier que la méthode vue dans la section 3.2.2, qui se traduit par l'utilisation de la formule (3.1), donne effectivement de meilleurs résultats. Ainsi, pour la variable  $\eta$ , le jeu de données **C1.SOCOA** pourra être utilisé tel quel pour l'analyse des dommages qui sera effectuée dans le chapitre 6.

### 4.3 Séries temporelles corrigées en distribution

La série temporelle de niveaux d'eau **C1.SOCOA** est une suffisamment bonne représentation de la réalité pour être utilisée dans le cadre d'une étude de longue durée sur les événements de submersion. Concernant les données représentant les états de mer, nous avons vu dans les sections 4.2.1 et 4.2.2 que les simulations ne semblaient pas approcher suffisamment bien la réalité, ayant notamment tendance à sous-estimer les grandes vagues. La simulation WWMII couvre une fenêtre temporelle suffisamment longue pour convenir à l'étude faite dans ce document, ce

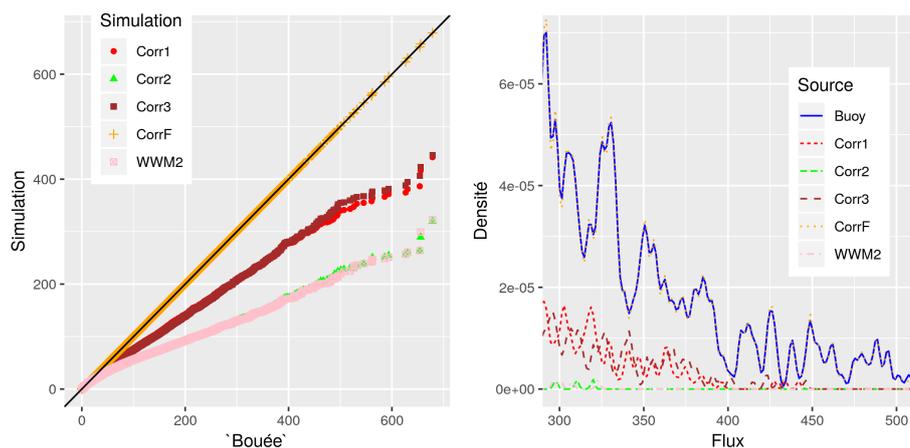


FIGURE 4.9 – Diagrammes quantiles-quantiles (à gauche) et fonctions de densités (à droite) pour le flux P (en  $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) pour la série temporelle de la bouée, de la simulation WWMII et les quatre corrections testées au point de la bouée d'Anglet.

qui n'est malheureusement pas le cas de la simulation Homere. Ainsi, pour pouvoir exploiter la simulation WWMII, une série de tests de correction, basée sur les transformations en probabilité et quantile a été effectuée selon la méthode présentée dans la section 4.1.3 et résumée par l'équation (4.3). Les résultats seront présentés ci-après en détail pour le point de la bouée d'Anglet.

Pour tester l'efficacité d'une correction en distribution fondée sur l'équation (4.3), les méthodes de comparaisons quantiles-quantiles et les graphes des densités estimées vus dans la section 4.1.2 seront encore une fois utilisés. Le flux P semblant d'un point physique une variable cruciale pour potentiellement expliquer les dégâts liés à la submersion, les résultats des corrections seront considérés comme satisfaisants quand une série temporelle de la variable du flux P aura une distribution similaire à celle du flux calculé à partir des données observées. Plusieurs essais de correction sur les variables impliquées dans le calcul du flux (2.6),  $H_s$  et  $T_{m10}$ , ont été effectués pour le point de la bouée d'Anglet :

- **Corr1** : correction en distribution de  $H_s$  uniquement;
- **Corr2** : correction en distribution de  $T_{m10}$  uniquement;
- **Corr3** : correction en distribution de  $H_s$  et de  $T_{m10}$ .

La figure 4.9 montre dans sa partie gauche les diagrammes quantiles-quantiles obtenus en comparant les valeurs observées du flux P au point de la bouée d'Anglet avec les valeurs simulées par WWMII, ainsi qu'avec les valeurs des méthodes de correction ci-dessus. Pour résumer, la série temporelle du flux de **BOUEE.ANG** est comparée successivement à celle issue de **WWMII.ANG**, de **Corr1**, de **Corr2** et enfin de **Corr3**. La partie droite de la figure correspond aux densités estimées à partir des mêmes séries temporelles du flux.

Comme on peut le constater sur la figure 4.9, la correction sur  $T_{m10}$  seulement (**Corr2**, en vert sur les graphes) n'améliore presque pas la distribution des valeurs du flux. En ce qui concerne la correction sur les hauteurs de vagues uniquement (**Corr1**, en rouge sur les graphes), elle conduit à une amélioration sensible du flux

tout en restant une sous-estimation du flux réel. La conclusion est très similaire pour **Corr3** (en marron sur les graphes).

Au vu de ces résultats, nous avons décidé de procéder à des corrections en distribution de cinq variables pour la série temporelle issue de la simulation WWMII :  $H_s$ ,  $T_{m10}$ ,  $\theta_m$ ,  $P$  et  $R_{2\%}$ . Sans surprise, la distribution corrigée du flux **CorrF** (en orange sur la figure) coïncide alors parfaitement sur la figure 4.9 avec la distribution des valeurs observées au point de la bouée d'Anglet. Un exemple de comparaison entre les données mesurées par la bouée (en rouge), la simulation (en bleu) et la simulation corrigée (en vert) est visible sur la figure 4.10. Pour cet exemple, la bouée a un pas de temps de 30 minutes alors que les données simulées ont un pas de temps de 3 heures. La correction de  $H_s$  montre, pour une grande partie des dates de cet exemple, une amélioration de la représentation de cette variable. Néanmoins, nous pouvons noter que le fait de corriger la distribution peut diminuer légèrement la précision pour certains points. Les événements de tempête peuvent être engendrés par différents types de dépression océanique, pour cette correction en distribution aucune différence significative de qualité de correction n'a pu être observée sur l'intégralité du jeu de données.

Une procédure similaire a été effectuée pour les données simulées par WWMII au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz. Les résultats, équivalents, sont résumés par la figure 4.11.

Finalement, dans la suite du document, les jeux de données **WWMII.ANG** et **WWMII.SJL** correspondront ainsi aux versions de ces séries temporelles où chacune des variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$ ,  $T_p$ ,  $P$ ,  $\theta_m$  et  $R_{2\%}$  a été corrigée par transformation en probabilité et quantile à l'aide de l'équation (4.3). Pour former les jeux de données finaux de variables d'aléa, la série temporelle **C1.SOCOA** sera utilisée conjointement et synchronisée à ces deux jeux de données. Notons que ces données couvrent la période 1949-2015.

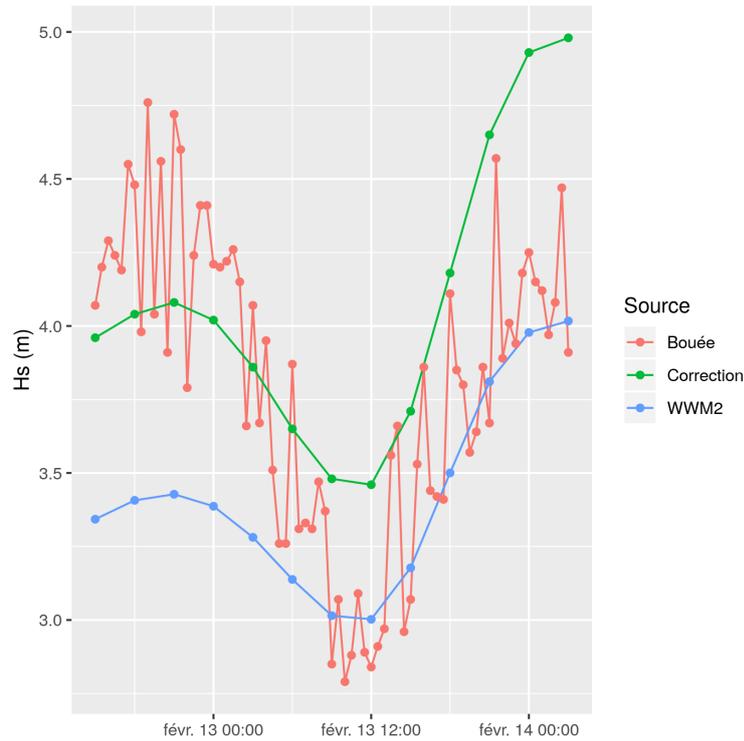


FIGURE 4.10 – Valeurs de  $H_s$  en  $m$  pour la bouée (en rouge), **WWMILANG** avant (en bleu) et après (en vert) correction au niveau du point de la bouée d'Anglet entre le 12 et le 14 février 2011.

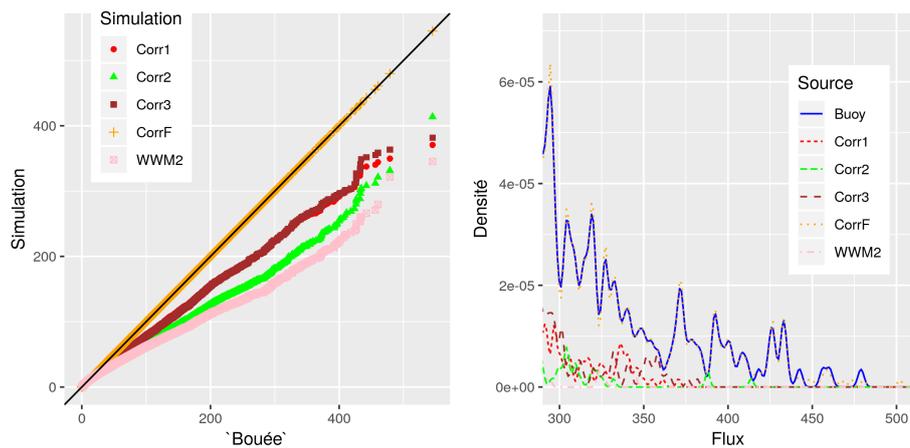


FIGURE 4.11 – Diagrammes quantiles-quantiles (à gauche) et fonctions de densités (à droite) pour le flux  $P$  (en  $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) pour la série temporelle de la bouée, de la simulation WWMII et les quatre corrections testées au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz.

# Chapitre 5

## Évènements de submersions et dégâts pour la côte basque

### Sommaire

---

<b>5.1 Le Pays basque français</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>5.2 Recherche documentaire sur les évènements de submersion</b> . . .	<b>53</b>
5.2.1 Recensement des sources d'informations . . . . .	53
5.2.2 Création d'un premier tableau de données . . . . .	54
5.2.3 Premier catalogue de tempêtes . . . . .	55
5.2.4 Choix de Biarritz comme ville pilote . . . . .	56
<b>5.3 Catalogue des évènements identifiés</b> . . . . .	<b>61</b>
5.3.1 Résultats pour la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz . . . . .	61
5.3.2 Résultats pour la Grande Plage de Biarritz . . . . .	63

---

Dans le chapitre précédent, des séries temporelles couvrant la période 1949-2015 ont été obtenues pour les variables d'aléa décrites dans le chapitre 2. La qualité de ces données simulées ou issues de réanalyses a été vérifiée et corrigée dans le cas des séries temporelles d'états de mer pour une meilleure adéquation à la réalité.

Afin de pouvoir expliquer les dégâts à la côte lors d'évènements de submersion, il est nécessaire d'obtenir, simultanément aux séries temporelles de variables d'aléa, des observations de présence/absence de dégâts. Pour obtenir de telles observations, il a été nécessaire de réaliser un travail de recherche historique à partir de nombreuses sources de données de fiabilités variables. Ce travail a été effectué en collaboration avec deux étudiantes, Marion Beauvivre et Estelle Egurolla, lors de leur stage de fin de Master. Dans un premier temps, leurs missions étaient d'aider au recensement des évènements potentiellement liés à la submersion et aux dégâts à la côte à partir des sources d'information disponibles (presse, archives municipales et départementales). Dans un deuxième temps, en procédant par recoupements, il a été nécessaire de confirmer ou d'infirmer le caractère réel de ces évènements.

Les résultats de ces travaux prennent la forme d'un catalogue de tempêtes donnant les dates de début et de fin de chaque évènement ainsi que l'intensité des dé-

gâts.

Le chapitre est organisé comme suit. Tout d’abord, le travail qui a permis de lister tous les évènements potentiels de submersion pour toute la côte basque française sera décrit. Les processus d’affinage et de recoupement d’informations permettant de confirmer ou d’infirmier ces évènements seront ensuite présentés. Notons que, pour des raisons de temps et de moyens, la recherche s’est finalement focalisée sur deux zones d’études : la Grande Plage de Biarritz et la digue de l’Artha à Saint-Jean-de-Luz.

Le contenu de ce chapitre a donné lieu à une publication dans le *Journal of Coastal Research* lors de la conférence “International Coastal Symposium” (ICS 2018) à Busan, Corée du Sud, en mai 2018. L’article est disponible en annexe pages 118 à 123.

## 5.1 Le Pays basque français

L’étude réalisée dans ce document porte sur la partie littorale du Pays basque français. Dans la section 1.1, cet espace a été présenté succinctement d’un point de vue historique et géographique. Ce territoire, à cheval entre la France et l’Espagne, est délimité par le Béarn à l’est, le département des Landes au nord, les Pyrénées au sud et le Golfe de Gascogne à l’ouest. La carte de la figure 1.1 précise cette situation. Huit communes littorales sont recensées au sein de cette région : Anglet, Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz, Ciboure, Urrugne et Hendaye. Le profil naturel du Pays basque est caractérisé par ses roches escarpées, ses plages de longueur moyennes séparées par des caps et ses falaises peu élevées. Plus précisément, sur une bande d’une quarantaine de kilomètres, il y a alternance entre falaises rocheuses et plages sableuses. Ce type de littoral s’oppose, par exemple, aux plages Landaises sensiblement plus longues.

Le littoral basque présente une forte vulnérabilité aux évènements de submersion et plus généralement à l’océan. En effet, les phénomènes climatiques (vents, vagues,...) et anthropiques (urbanisation, démographie,...) ont une forte influence sur le morphodynamisme du littoral. En France, la baisse de mortalité subséquente à l’industrialisation démarrée au XIXe siècle a provoqué une croissance démographique. Les littoraux ont ainsi constaté une densification de leurs espaces urbains. Cette évolution s’explique notamment par les changements sociétaux et culturels rencontrés en France. Le développement d’une société de loisirs a amené un développement d’activités telles que le tourisme balnéaire ou le thermalisme, notamment au Pays basque. Ces changements ont largement vectorisé un aménagement urbain très proche du trait de côte. Par exemple, dans la ville de Biarritz, de nombreux bâtiments publics comme le Casino de l’Hôtel de ville sont au bord de la Grande Plage.

## 5.2 Recherche documentaire sur les évènements de submersion

Dans cette section, nous allons détailler le protocole mis en place pour explorer les sources de données décrivant les dommages ayant potentiellement affectés le littoral du Pays basque. Rappelons que l'objectif est de constituer une base de données sous forme de catalogue de tempêtes historiques et notons qu'une telle base permettrait, entre autres, de déterminer le caractère exceptionnel ou non de l'hiver 2013-2014.

Malgré les progrès des prévisions météorologiques, il est impossible d'anticiper précisément la quantité de dégâts qu'un évènement de submersion pourrait produire. En réunissant des informations historiques de 1950 à aujourd'hui, il devrait être possible d'avoir une vision plus précise de la quantité de dégâts engendrée par la submersion au cours de cette période. Les recherches sur les dégâts d'évènements de submersion ont porté, dans un premier temps, sur l'intégralité de la côte basque.

La méthode a consisté à identifier la date d'un évènement, puis à quantifier les dégâts ayant eu lieu au cours de cet évènement. Cette étude s'est inspirée du guide méthodologique du projet COCORISCO (CONnaissance, COMpréhension et gestion des RISques Côtiers) [20] qui propose d'utiliser les recherches archivistiques pour localiser des évènements tout en prenant en considération l'évolution de la vulnérabilité de la bande littorale.

### 5.2.1 Recensement des sources d'informations

Trois sources de données ont été utilisées pour réunir des informations sur chaque évènement : les archives de la presse écrite, les archives départementales et les archives municipales. Tout d'abord, nous allons détailler les processus de récupération des données pour chaque source.

Les catalogues de données Europresse et Factiva sont des archives numérisées des médias. Leur avantage principal est le regroupement dans une seule base de données de différentes sources d'informations (presse écrite, radio, ...). L'utilisation conjointe des mots clés *Biarritz*, *dégâts*, *vague* et *submersion*, ainsi que l'alternance de l'utilisation des deux bases de données, a permis de retrouver des articles issus notamment du quotidien Sud-Ouest et du journal Le Monde. Les archives de Sud-Ouest remontent à 1994 alors que celle du Monde remontent jusqu'en 1990. En plus de l'utilisation de ces bases de données, une recherche au sein des archives papiers de la médiathèque municipale de Bayonne a été effectuée. Cette dernière possède la plupart des journaux depuis 1960. Pour éviter de traiter un trop grand volume de données à la main, une sélection de dates a tout d'abord été effectuée en utilisant les données d'états de mer vues et corrigées au chapitre précédent. En se basant sur  $H_s$ , il a été décidé de ne garder que les périodes pour lesquelles la hauteur significative des vagues dépasse 5 m (ce qui correspond, approximativement, au quantile d'ordre 99% de  $H_s$ ) pendant au moins 12 heures consécutives. À partir des dates obtenues

grâce à cet algorithme de sélection, une lecture des journaux à des dates proches a permis de repérer les évènements ayant potentiellement conduit à des dégâts.

Les archives départementales et les archives municipales regroupent les documents et dossiers des travaux et réunions menés en cas de dégâts liés à la submersion. Ces informations sont assez peu accessibles et sont noyées dans des dossiers très volumineux. De plus, les informations sont relatives uniquement aux infrastructures et aux bâtiments publics. Néanmoins, ce type de dossier peut aider à confirmer la présence d'un évènement au cours d'une période donnée.

Les informations issues de la presse et des archives présentent des biais importants. En effet, elles sont lacunaires et subjectives de par leur format. Par exemple, un article de journal relate des faits marquants et volontairement n'est pas exhaustif en fonction de l'auteur et de la manière dont la rédaction de l'article a été menée. Un dossier public est, quant à lui, traité du point de vue d'une commune ou du département avec un étiquetage qui n'est pas toujours optimal et des informations qui peuvent être difficiles à interpréter quantitativement. Par exemple, on peut trouver plusieurs fois le même document concernant le même évènement avec des coûts de travaux différents selon le stade d'avancement du projet de réparation. De plus, certains travaux ne correspondent pas forcément à un évènement spécifique. De manière générale, les informations issues de ces recherches sont de nature qualitative et ont besoin d'être affinées pour obtenir un catalogue de tempêtes le plus complet et précis possible.

### 5.2.2 Création d'un premier tableau de données

Les différentes sources décrites dans la section précédente ont été utilisées pour la recherche des évènements de submersion. Pour obtenir des résultats intéressants, il a fallu tout d'abord homogénéiser les données en fonction des différentes sources : les articles de journaux ont plutôt tendance à décrire les dégâts alors que les dossiers des archives départementales et municipales proviennent principalement de services techniques avec des coûts de réparation. Pour créer une fiche tempête, il a été ainsi nécessaire d'interpréter correctement chaque source de données, et de compiler les données issues de chaque source de manière la plus claire possible. Notons que le travail de recueil des données s'est avéré très fastidieux et extrêmement coûteux en temps, ce qui fait que certaines sources n'ont pas encore été explorées (comme les archives municipales de Bayonne par exemple).

Ce premier travail de recherche historique a conduit à l'identification de 102 documents relatifs à des tempêtes potentielles impactant un ou plusieurs endroits que nous appellerons *dossiers sources* dans la suite. Nous allons maintenant décrire un premier affinage des informations récoltées.

Les 102 dossiers sources obtenus ont conduit à la réalisation d'un tableau très volumineux dans lequel chaque ligne correspond à un endroit impacté par un évènement. Ainsi, fréquemment, un même dossier source a conduit à l'insertion de plusieurs lignes (une par endroit référencé dans le dossier). De plus, il ne peut pas

être exclu à ce stade que plusieurs lignes (et donc plusieurs dossiers sources) concernent en réalité un même évènement. La réalisation de ce tableau a été possible après de très longues heures de lecture des dossiers sources et de restitution d'informations.

Chaque ligne du tableau a été divisée en trois parties :

- une première partie concernant la description des aléas;
- une seconde partie liée aux dégâts;
- et une dernière partie listant les réactions humaines engendrées.

En ce qui concerne la partie décrivant les aléas, elle peut contenir les dates de début et de fin des évènements. Si cette information est présente, cela permet ensuite de regrouper les dossiers sources concernant un même évènement. Pour chaque ligne, les informations considérées permettent souvent d'identifier la nature de l'évènement en se focalisant sur les données de précipitations, de vent, sur la hauteur des vagues, la marée et, plus généralement, sur tout ce qui peut conduire à la submersion. Il est ainsi fréquemment possible de dire si, oui ou non, il s'agit d'un évènement de submersion. En conclusion, cette première série d'informations du tableau a permis d'identifier les différents évènements et, éventuellement, leurs dates de survenue.

En ce qui concerne la partie du tableau décrivant les dégâts, elle permet souvent de déterminer le lieu et la nature des dommages occasionnés. Des bâtiments et infrastructures ont-ils été touchés? Des blessés ou morts ont-ils été recensés? Ces informations permettent de quantifier l'intensité des dégâts au cours d'un évènement, et, entre autres, de comparer plusieurs évènements distincts en termes d'impact. Pour cela, à partir de la lecture des dossiers sources concernant un évènement, nous avons déterminé si l'évènement a été très destructeur ou non.

Enfin, en ce qui concerne la partie du tableau liée aux réactions humaines, la lecture des dossiers sources a permis d'obtenir des informations sur l'intervention, au cours de l'évènement, de services d'urgence tels que les pompiers, la gendarmerie ou les services hospitaliers. De plus, les documents techniques référencés dans les dossiers sources décrivent régulièrement les interventions humaines de réparation ou de prévention liées aux évènements de submersion. La difficulté a été alors de bien distinguer les actions qui ont été entreprises consécutivement à un évènement particulier des travaux et décisions qui appartiennent à des politiques plus globales de gestion du littoral.

### 5.2.3 Premier catalogue de tempêtes

À partir du tableau décrit dans la section précédente structurant les informations contenues dans les 102 dossiers sources, l'objectif a été ensuite d'obtenir un catalogue de tempêtes. Pour cela, il a fallu être capable de regrouper les évènements correspondant aux mêmes dates. Le caractère imprécis des informations disponibles a rendu ces regroupements très compliqués. Devant la complexité de la tâche, nous avons décidé de restreindre l'étude à la ville de Biarritz. Ainsi, dans le

tableau décrit dans la section précédente, nous n'avons gardé que les lignes mentionnant explicitement la ville de Biarritz. Malheureusement, il s'est avéré très difficile à ce stade de clairement identifier les dates de début et de fin des évènements. De plus, une quantification claire des dégâts a été plus compliquée que prévu. Nous avons donc réalisé qu'une nouvelle analyse des informations ainsi que de nouvelles recherches documentaires étaient nécessaires afin d'obtenir un catalogue de tempêtes fiable.

#### 5.2.4 Choix de Biarritz comme ville pilote

Dans le tableau obtenu précédemment, la ville de Biarritz est celle qui s'avère la plus représentée. Cela s'explique par sa vulnérabilité aux évènements de submersion et son urbanisation. Les évènements récents de 2013-2014 ont conduit à totalement reconsidérer les politiques de prévention et de protection de la zone littorale de Biarritz qui fait une dizaine de kilomètres. Comme le montre la photographie 5.1, le littoral nord de la ville, proche du centre historique a l'urbanisation la plus dense. Parmi les sites de la ville inscrits au patrimoine en tant que sites historiques, le Phare de la Pointe Saint-Martin, l'Hôtel du Palais et le Casino Municipal sont directement placés face à l'océan Atlantique.

Afin de recenser efficacement les informations liées aux dégâts, cinq zones littorales de la commune de Biarritz ont été sélectionnées. Il s'agit des zones identifiées dans les photographies 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6, respectivement. Ces zones sont présentées en détails dans le rapport de stage de Marion Beauvivre [44] qui contient également une description des enjeux humains et matériels exposés à la submersion. On peut notamment citer le Rocher de la Vierge sur le plateau de l'Atalaye (voir photographie 5.2) et la Grande Plage (voir photographie 5.4). Rappelons au passage que c'est la pente de cette dernière qui a été utilisée dans les calculs de run-up dans la section 4.2.1. Globalement, la zone étudiée comporte une forte urbanisation liée à la pression démographique ayant augmenté au cours du siècle dernier. Cela a résulté en l'édification de nombreux bâtiments et installations privés et publics situés à basse altitude et très proches du front de mer. Ces bâtiments présentent une forte vulnérabilité aux évènements de submersion et donc un enjeu considérable pour la ville de Biarritz.

L'analyse du tableau des dossiers sources a conduit à l'identification de 22 évènements ayant impacté la ville de Biarritz depuis 1950. Ces derniers sont listés dans le tableau de la figure 5.7 qui montre, pour chaque évènement, les zones impactées et qui sont référencés dans les dossiers sources. Un indice d'intensité des dégâts est également donné dans la deuxième colonne du tableau. Il correspond à une quantification subjective de cette intensité. L'information géographique concernant les zones impactées n'est également pas exhaustive. En effet, il est probable que l'absence de données soit uniquement due à une sélection d'informations dans les documents historiques consultés. Cela est d'autant plus vrai pour les évènements les moins récents pour lesquels la recherche historique n'a pas permis d'identifier tous les documents pertinents.



FIGURE 5.1 – Photographie de la ville de Biarritz [44].



FIGURE 5.2 – Photographie de la zone 1 : le plateau de l'Atalaye à Biarritz.



FIGURE 5.3 – Photographie de la zone 2 : le Port Vieux à Biarritz.

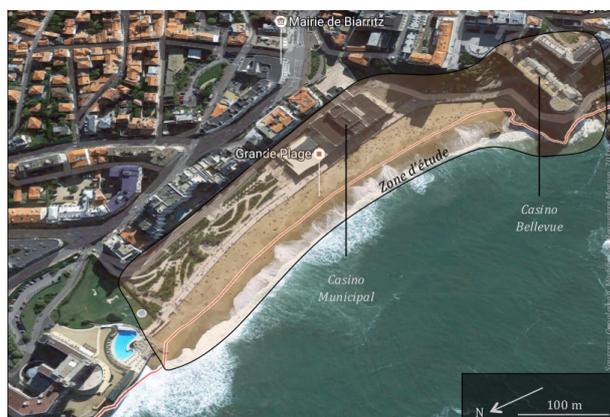


FIGURE 5.4 – Photographie de la zone 3 : la Grande Plage à Biarritz.



FIGURE 5.5 – Photographie de la zone 4 : la plage Miramar à Biarritz.



FIGURE 5.6 – Photographie de la zone 5 : le cap Saint Martin à Biarritz.

Date d'arrivée de l'aléa	Quantification subjective de l'intensité des dégâts	Zone du Plateau de l'Atalaye	Zone du Port des Pêcheurs	Zone de la Grande Plage	Zone de la Plage du Miramar	Zone du Cap Saint Martin
2 octobre 1951	2					
28 décembre 1951	2	o	o	o		
14 décembre 1958	1		o			
27 décembre 1960	1					
12 novembre 1961	1					
18 janvier 1965	2			o		
2 novembre 1967	3		o	o		
14 décembre 1968	1			o		
fin janvier 1988	0					
30 janvier 1990	2			o	o	
5 février 1996	2	o	o	o	o	
30 décembre 1998	2			o		
27 décembre 1999	2	o	o	o	o	
6 novembre 2000	1			o		
14 août 2008	1		o	o		
23 janvier 2009	2		o	o	o	o
9 novembre 2010	2	o	o	o	o	o
4 janvier 2014	3	o	o	o	o	o
1 février 2014	2	o	o	o	o	o
2 mars 2014	2	o	o	o	o	o
24 février 2015	1					
9 février 2016	2	o			o	

FIGURE 5.7 – Tableau résumant les zones impactées pour chaque évènement répertorié lors de la première partie de la recherche historique. La présence du symbole “o” indique la présence d’informations de dégâts dans la zone considérée. La date correspond à une date de début d’évènement. L’indice d’intensité des dégâts a été subjectivement associé à un évènement via les dossiers sources le concernant.

### 5.3 Catalogue des évènements identifiés

Comme cela a été expliqué dans les sections précédentes, durant la première phase de recherche documentaire, de nombreuses informations ont été récupérées sur les évènements de submersion de 1950 à nos jours. Cette grande quantité d'informations n'a malheureusement pas permis d'établir une classification très précise des tempêtes. En effet, les informations se sont avérées trop diffuses de par leurs formats et leurs sources. Cette première étape a cependant permis de recueillir beaucoup de données sur les dégâts. Une deuxième analyse du tableau d'évènements décrit dans la Section 5.2.2 s'est donc avérée nécessaire afin d'affiner les résultats et finalement obtenir un catalogue de tempêtes précis pour la ville de Biarritz.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec Estelle Egurolla lors de son stage de Master au laboratoire SIAME de janvier à juillet 2017. Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet MAREA présenté dans la section 1.4. Pour la stagiaire, l'objectif de ces travaux a été, dans un premier temps, d'assimiler la thématique des dommages de submersion, et, dans un second temps, a donné lieu à la réanalyse des données décrites précédemment (notamment, les données ayant permis de construire le tableau 5.7). Cela a ainsi permis de produire un catalogue de tempêtes concernant la Grande Plage de Biarritz et d'essayer d'établir une base de données similaire pour la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz.

#### 5.3.1 Résultats pour la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz

Afin d'essayer d'établir un catalogue de tempêtes ayant impacté la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz, des échanges avec Alain Roudil, directeur général du Développement Économique et Territorial du Conseil Départemental des Pyrénées-Atlantiques, ont été effectués en complément des recherches documentaires précédemment décrites. Cela a permis de bien comprendre la gestion d'une telle construction et d'avoir accès aux informations les plus fiables possibles sur l'ouvrage.

La baie de Saint-Jean-de-Luz est caractérisée par deux ouvrages : la digue de l'Artha et la jetée de Socoa (voir figure 5.8). L'entretien de ces édifices de protection est effectué grâce à des blocs de pierre (photographie 5.9) qui permettent la consolidation des ouvrages après le passage des tempêtes. Chaque année, le Conseil Général des Pyrénées-Atlantiques décide du nombre de blocs à mouiller sur la base de trois analyses. La première analyse consiste à inspecter la partie immergée du talus grâce à des bathymétries multifaisceaux. Des analyses topographiques simples sont ensuite utilisées pour faire des relevés de la partie émergée. Enfin, une équipe de plongeurs va évaluer les mouvements des blocs au sein des cavités de l'ouvrage. Ce protocole et la disponibilité des données associées nous ont décidé à explorer les archives municipales de Socoa liées à la gestion de ces blocs pour évaluer les dommages recensés sur la digue de l'Artha.

Les archives de Socoa et la contribution de Monsieur Roudil nous ont ainsi permis de créer une base de données sur les blocs utilisés chaque année ainsi que



FIGURE 5.8 – Photographie de la baie de Saint-Jean-de-Luz.



FIGURE 5.9 – Bloc de béton utilisé pour renforcer la digue de l'Artha en vue de l'hiver suivant.

sur les travaux de maçonnerie réalisés. Les résultats sont disponibles en annexe aux pages 110 à 112. Bien que les données récentes soient relativement complètes, ce n'est pas le cas pour toutes les données relatives à l'entretien de la digue au cours

du XXe siècle. De plus, les données de nature financière concernent souvent l'ensemble de la baie et ne permettent donc d'évaluer le montant des travaux pour la seule digue. Ces informations n'ont donc pas pu être exploitées efficacement dans le cadre de cette étude. Ainsi, nous n'avons malheureusement pas été en mesure d'établir une variable reflétant suffisamment bien les dommages subis par la digue au cours du temps et, en conséquence, nous n'avons pas été en mesure d'établir un catalogue fiable de tempêtes ayant impacté cet ouvrage et, par conséquent, de réaliser une étude statistique de dommages comme celle réalisée sur Biarritz au chapitre 6.

### 5.3.2 Résultats pour la Grande Plage de Biarritz

Pour la Grande Plage de Biarritz, l'objectif a été d'obtenir un résumé clair et concis de chaque évènement de submersion pour la période 1949-2015 en affinant les recherches documentaires effectuées précédemment. Cela a également permis d'alimenter les bases de données du GIS Littoral Basque.

À partir des dossiers sources énumérés précédemment, nous avons cherché à comptabiliser tous les évènements recensés et à les caractériser précisément. La réanalyse a consisté à extraire uniquement les données nécessaires à la poursuite de notre étude. Nous rappelons que les informations qui vont nous intéresser concernent les dates de survenue (début et fin), la submersion (oui ou non) et les dégâts (quantité/intensité).

La submersion est plutôt difficile à déterminer pour chacun des évènements retenus. En effet, ce terme est rarement utilisé dans les documents et la nature de chaque aléa est assez difficile à établir uniquement via leur lecture. Pour aider à déterminer si un évènement répertorié correspond à de la submersion, les séries temporelles provenant des jeux de données validés et corrigés au chapitre 4 ont été utilisées : lorsqu'un évènement de submersion est suspecté après lecture des documents, il a été confirmé ou infirmé en consultant les valeurs des variables  $H_s$  et  $\eta$  aux dates correspondantes. Ce processus a uniquement servi de guides en cas de doutes, le recensement d'un évènement est avant tout basé sur l'analyse documentaire.

Pour chaque tempête potentielle, nous avons procédé comme suit :

- si la submersion est peu probable, l'indice de submersion a été mis à 0;
- si la submersion est très probable, l'indice de submersion a été mis à 1.

Pour l'indice quantifiant les dommages liés à un évènement, une relecture de chaque source d'information liée à la tempête a été effectuée et l'intensité de dégâts a été quantifiée de la façon suivante :

- l'indice a été mis à 0 si aucun dommage n'est recensé dans les sources documentaires;
- la valeur 1 a été attribuée à l'indice dans le cas de dommages relativement peu importants;

<b>- <u>Tempête n° ...</u></b>	
<b>Date de début de l'événement :</b>	
<b>Date de fin de l'événement :</b>	
<b>Principales communes touchées</b>	
<b><u>Par la tempête :</u></b>	<b><u>Par la submersion :</u></b>
<b>Nature de l'aléa :</b>	
<i>Description d'après la presse et les archives.</i>	
<b>D'après la presse et les archives, la tempête est caractérisée par :</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>- Le vent</li><li>- La pluie</li><li>- Les vagues</li><li>- La hauteur d'eau ou les forts coefficients</li><li>+ Données chiffrées si possible</li></ul>	
<b>Description des dommages :</b>	
<i>Résumé d'après la presse et les archives.</i>	
<b>Sources :</b>	
<b>Interprétation :</b>	
<i>Suspicion de submersion ?</i>	

FIGURE 5.10 – Présentation générique d'une fiche tempête pour le catalogue réalisé.

— pour des dommages importants voire irréversibles, la valeur 2 a été utilisée.

La réanalyse de toutes les informations disponibles a permis de comptabiliser 30 tempêtes entre 1950 et 2015. Afin de synthétiser les connaissances obtenues par les travaux de recherche historique, des fiches tempêtes au format A4 ont été créées. Un exemple de fiche pour un évènement est donné dans la figure 5.10.

L'ensemble des informations contenues dans ces fiches est synthétisé dans le tableau donné en annexe aux pages 105 à 108. La base de données ainsi obtenue est clairement plus précise que lors de la première phase de recherches documentaires et nous estimons que son degré de fiabilité est assez élevé. Néanmoins, la nature des sources d'informations étant la même, il faut tout de même garder à l'esprit qu'il peut subsister des erreurs dans le catalogue réalisé.

Rappelons que nous avons choisi de concentrer les recherches sur la commune de Biarritz pour des raisons de temps et de moyens. Ainsi, la recherche historique présentée dans ce travail a avant tout cherché à mettre en évidence les dommages concernant cette ville. Un dernier affinage a été réalisé sur l'ensemble des données pour recentrer les résultats sur la Grande Plage de Biarritz. En plus des données précédemment recueillies, une exploration des archives de la commune de Biarritz a été réalisée. Le tableau présenté en annexe aux pages 108 à 110 regroupe tous les renseignements sur les évènements recensés au cours de ces travaux de recherche. Ce tableau a servi de base pour créer une série temporelle de dommages pour la ville de Biarritz. Un catalogue plus complet a été établi [54] et regroupe toutes les informations concernant les tempêtes à Biarritz. Dans ce document, quatre indices concernant la submersion et les dommages sont utilisés pour décrire les évènements. Ces indices synthétisent les informations des bases de données produites au cours des travaux précédents. En plus des indices précédemment utilisés, des indices de confiance ont été ajoutés afin de pouvoir distinguer les évènements pour lesquels les informations récoltées semblent complètes des évènements où les documents soulèvent quelques doutes. Ainsi, en résumé :

- indice de submersion : 1 si submersion, 0 sinon ;
- indice de confiance de submersion : 1 si l'on peut accorder une grande confiance à l'indice précédent, 0 sinon ;
- indice de dommages : 0 si pas de dommages, 1 si dommages modérés et 2 si dommages importants ;
- indice de confiance de dommages : 1 si l'on peut accorder une grande confiance à l'indice précédent, 0 sinon.

Pour la Grande Plage, les évènements recensés sont décrits dans le tableau 5.1. Pour les dégâts, 21 évènements d'intensité 0 (dont 1 avec une faible confiance), 4 évènements d'intensité 1 (dont 1 avec une confiance à 0 correspond à novembre 1967) et 5 évènements d'intensité 2 (tous avec une confiance de 1) ont été dénombrés. Pour la submersion, 13 évènements ont été répertoriés, soit 4 de plus que pour les évènements avec dommages. Cela signifie que seuls quatre évènements ont conduit à de la submersion sans faire de dommages. Notons néanmoins que 2 de ces évènements n'ont pas une bonne confiance. Pour cette raison, l'analyse présentée dans le chapitre suivant n'a pas utilisé les indices de submersion mais seulement les indices de dommages.

Nom/Num.	Début	Fin	Submersion	Conf.	Dommages	Conf.
1	28/12/1951	30/12/1951	1	1	2	1
2	14/12/1958	15/12/1958	0	0	0	1
3	12/11/1961	14/11/1961	0	0	0	1
4	17/01/1965	20/01/1965	1	1	1	1
5	30/10/1967	05/11/1967	1	1	1	0
6	11/12/1968	17/12/1968	1	1	0	0
7	20/01/1972	22/01/1972	1	0	0	1
8	06/02/1974	08/02/1974	1	0	0	1
9	24/01/1984	25/01/1984	0	0	0	1
10	30/01/1988	01/02/1988	0	0	0	1
11	25/02/1989	27/02/1989	0	0	0	1
12	30/01/1990	01/02/1990	1	1	1	1
13	07/02/1996	09/02/1996	0	0	0	1
14	28/12/1998	02/01/1999	1	1	1	1
Martin	27/12/1999	31/12/1999	0	1	0	1
16	06/11/2000	10/11/2000	0	0	0	1
17	07/12/2000	09/12/2000	0	1	0	1
18	14/08/2008	16/08/2008	0	0	0	1
Klaus	23/01/2009	25/01/2009	0	0	0	1
20	09/11/2010	11/11/2010	1	1	2	1
Quirin	15/02/2011	17/02/2011	0	0	0	1
22	18/02/2011	23/02/2011	1	1	0	1
23	13/12/2011	18/12/2011	0	0	0	1
24	26/01/2013	31/01/2013	0	1	0	1
25	09/02/2013	14/02/2013	0	0	0	1
Dirk	23/12/2013	26/12/2013	0	0	0	1
Hercules	04/01/2014	08/01/2014	1	1	2	1
Nadja	01/02/2014	03/02/2014	1	1	2	1
Andrea	26/02/2014	03/03/2014	0	0	0	1
Christine	03/03/2014	06/03/2014	1	1	2	1

TABLEAU 5.1 – Base de données des dégâts liés à la submersion à Biarritz. Quand les événements correspondent à des tempêtes connues, leur nom est utilisé sinon leur numéro. Les indices de confiance sont codés en 1 (confiance) ou 0 (pas confiance). Les dégâts sont codés en intensité 0 (faibles/absents), 1 (modérés) ou 2 (importants). Et la submersion est codé par 1 (présence) et 0 (absence).

# Chapitre 6

## Création d'une fonction de dommages pour la côte basque

### Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Caractérisation statistique des tempêtes à dommages</b>	<b>68</b>
6.1.1	Préparation de la série temporelle de variables d'aléa au large de Biarritz	69
6.1.2	Caractérisation statistique des toutes les tempêtes répertoriées	70
6.1.3	Modèles et règles de discrimination	72
6.1.4	Validation des règles	83
<b>6.2</b>	<b>Application au calcul de périodes de retour d'évènements de submersion</b>	<b>85</b>
6.2.1	Périodes de retour calculées à partir de la règle $R5(t)$	85
6.2.2	Périodes de retour calculées à partir de la règle $R6(t)$	88

---

Dans le chapitre 4, nous avons obtenu une série temporelle de variables d'aléa décrivant les états de mer et le niveau d'eau sur la période 1949-2015 aux points des bouées d'Anglet et de Saint-Jean-de-Luz. Dans le chapitre 5, suite à une recherche documentaire historique, nous avons été en mesure d'établir un catalogue raisonnablement précis de tempêtes ayant affecté la Grande Plage de Biarritz pendant la même période. En conséquence, étant donnée la proximité de la bouée d'Anglet et de la Grande Plage de Biarritz, nous avons à notre disposition une série temporelle mettant en relation la présence ou absence de dégâts à la côte pour la Grande Plage de Biarritz avec les valeurs des variables d'aléa au large de ce lieu.

Le premier objectif de ce chapitre a été d'obtenir une caractérisation statistique des tempêtes à dommages pour la Grande Plage de Biarritz, c'est-à-dire, de résumer statistiquement (de façon plus ou moins sophistiquée) les évènements ayant engendré des dégâts à l'aide de variables d'aléa comme  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $P$ ,  $\eta$ , etc. Cela a été effectué en espérant que les valeurs prises par les variables d'aléa pendant les évènements à dégâts sont significativement différentes de celles prises en dehors de ces évènements. D'un point de vue opérationnel, plusieurs combinaisons de variables d'aléa, que nous appellerons *règles* dans la suite, se sont avérées particulièrement

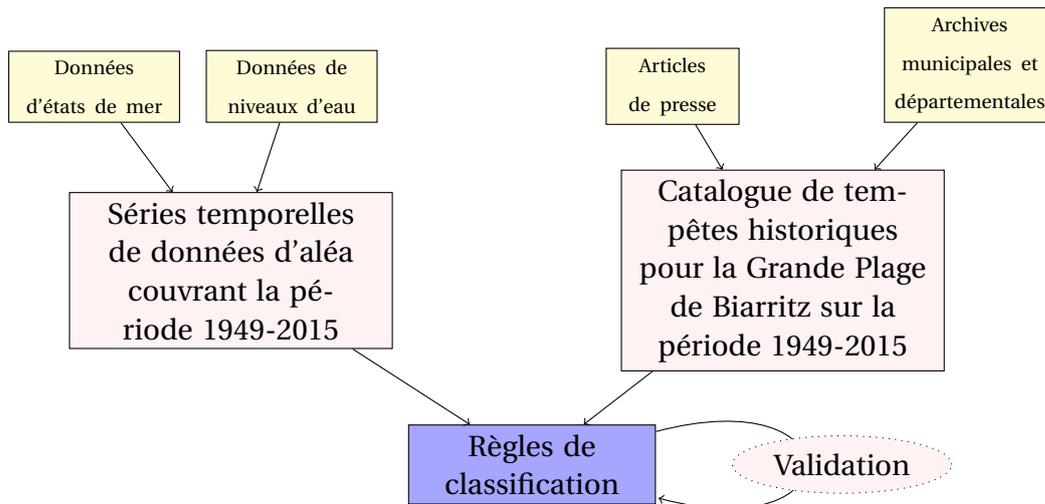


FIGURE 6.1 – Schéma résumant les différentes étapes effectuées dans ce travail dans le but de caractériser les tempêtes à dommages :

intéressantes pour discriminer les tempêtes à dommages des autres évènements. De façon naturelle, la qualité des règles obtenues a été évaluée en appliquant ces règles sur la série temporelle disponible de variables d'aléa de 1949 à 2015. Une règle a été jugée d'autant meilleure qu'elle permet de retrouver les évènements à dommages sans pour autant détecter des fausses tempêtes à dégâts (en supposant les données de dégâts comme exhaustives). La deuxième contribution de ce chapitre a été d'utiliser deux des règles obtenues pour estimer les périodes de retour des tempêtes répertoriées lors de la recherche documentaire historique .

## 6.1 Caractérisation statistique des tempêtes à dommages

D'un point de vue statistique, l'objectif a été d'utiliser les variables d'aléa (dont les séries temporelles ont été préparées au chapitre 4) comme variables *explicatives* et les indices de dommages élaborés via la recherche documentaire au chapitre 5 comme variables *à expliquer*. Le schéma 6.1 résume les différentes étapes effectuées dans le but de caractériser les tempêtes à dommages :

1. obtention de séries temporelles fiables de variables d'aléa pour la période 1949-2015 au large de Biarritz (chapitres 3 et 4) ;
2. élaboration d'un catalogue de tempêtes ayant impacté la Grande Plage de Biarritz pendant la même période (chapitre 5) ;
3. recherche de règles (ou de modèles statistiques) permettant de discriminer les tempêtes à dommages des autres évènements (sera abordé dans la section 6.1.3) ;
4. évaluation de la qualité de ces règles (sera abordé dans la section 6.1.4).

### 6.1.1 Préparation de la série temporelle de variables d'aléa au large de Biarritz

Comme expliqué dans les chapitres 3 et 4, différentes sources de données ont été utilisées pour produire des séries temporelles d'états de mer et de niveaux d'eau raisonnablement fiables et sans valeurs manquantes, couvrant la période 1949-2015. Les données ont été gérées et préparées grâce à des scripts en langage de programmation R [65].

**Série temporelle d'états de mer** Pour cette série, la simulation WWMII (voir Section 3.1.2.ii) a été choisie comme source de données principale et, au point de la bouée d'Anglet, une correction statistique, fondée sur les observations *in situ* ainsi que sur les transformations en probabilité et quantile, a été effectuée pour les variables  $H_s$ ,  $T_{m10}$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$ ,  $P$  et  $R_{2\%}$ . Le pas de temps de cette série temporelle caractérisant l'état de l'océan au large de Biarritz est de 3 heures et elle comporte 192 000 observations approximativement.

Même si cette série temporelle a été corrigée et qu'elle peut être considérée comme raisonnablement fiable, il est utile de rappeler les faits suivants :

- les données sont issues d'une simulation numérique réalisées sous différentes hypothèses précisées dans la section 3.1.2.ii;
- la correction effectuée grâce aux observations au point de la bouée d'Anglet repose sur l'hypothèse de stationnarité du phénomène aléatoire sous-jacent (voir section 4.1.3);
- les valeurs du run-up  $R_{2\%}$  dépendent de la valeur de la pente  $\beta$  de la Grande Plage qui varie en fonction du temps; or, cette valeur n'est connue que sur une petite fenêtre temporelle ( $\beta = 0.07$  sur une étude de 2017-2019 [15]) et a été utilisée pour calculer les valeurs de  $R_{2\%}$  sur toute la période, de 1949 à 2015.

**Série temporelle de niveaux d'eau** La série temporelle de niveaux d'eau provient quant à elle d'une réanalyse des données d'observation du marégraphe de Socoa comme expliqué dans la section 3.2.2. Étant donnée la proximité du marégraphe de Socoa et de Biarritz, il est naturel de considérer que cette série temporelle décrit également bien l'évolution du niveau d'eau au large de la Grande Plage de Biarritz. Le pas de temps de cette série est horaire et elle comporte environ 580 000 observations.

L'hypothèse qui a été adoptée dans cette partie du travail est que la submersion est généralement maximale quand le niveau d'eau atteint son maximum à chaque marée haute. Pour cette raison, nous avons eu besoin de connaître la valeur des variables d'états de mer avec la même fréquence que celle du niveau d'eau. Cela nous a conduit à interpoler la série temporelle de variables d'état de mer pour passer d'un pas de 3 heures à un pas d'une heure. L'interpolation a été effectuée de façon linéaire.

**Série temporelle de variables d'aléa** Après avoir synchronisé les séries temporelles de variables d'états de mer et de niveau d'eau pour obtenir une série temporelle de variables d'aléa au large de Biarritz, nous n'avons gardé que les observations correspondant au maximum de chaque marée (avec une marge d'erreur de 30 minutes vu le temps d'échantillonnage du marégraphe), ce qui revient, en moyenne, à garder une observation sur onze ou douze. Cette série comporte approximativement 48 000 observations et sera appelée **ALEA** dans la suite du chapitre.

### 6.1.2 Caractérisation statistique des toutes les tempêtes répertoriées

Les dates de début et de fin des évènements identifiés lors de la recherche documentaire décrite dans le chapitre 5 (voir tableau 5.1) ont été utilisées pour sélectionner les portions de la série temporelle **ALEA** correspondant à chaque évènement. À partir de chaque portion (c'est-à-dire, pour chaque évènement), nous avons calculé les maxima et moyennes de chacune des variables d'aléa. Ces résumés statistiques par évènement sont donnés dans les tableaux 6.1 et 6.2, respectivement. Ces deux tableaux seront appelés **STORMS** dans la suite du chapitre.

Les maxima de chacune des variables d'aléa pour chaque évènement ont été calculés afin d'essayer d'évaluer si les dégâts peuvent être expliqués par un pic d'intensité durant l'évènement. De façon analogue, les moyennes de chacune des variables d'aléa pour chaque évènement ont été calculées en supposant que c'est l'effet moyen de l'activité sur la durée de l'évènement qui est éventuellement responsable des dégâts. Nous noterons que les sommes cumulées de chaque variable sur la durée d'un évènement ont, dans un premier temps, également été calculées et analysées mais que les résultats ne sont pas exploitables. En annexe, la figure A2 montre le nuage de points des sommes cumulées de chaque évènement pour les variables  $\eta$  et  $P$ . Le résultat n'est pas interprétable pour distinguer les différents niveaux de dégâts des évènements

À partir des tableaux **STORMS**, l'objectif a ensuite été de trouver comment distinguer les tempêtes ayant conduit à des dégâts des autres évènements. D'un point de vue statistique, il s'agit de trouver un sous-ensemble de variables d'aléa permettant d'expliquer la présence ou l'absence de dégâts. Avant de nous lancer dans la recherche de modèles de discrimination que, comme indiqué précédemment, nous appelons *règles*, il nous a paru naturel de nous intéresser à la corrélation entre les variables d'aléa résumées. Une analyse en composantes principales (ACP) peut être réalisée pour comprendre ces corrélations. Par exemple, le cercle des corrélations obtenu après ACP du tableau 6.1 est donné dans la figure 6.2. Sans surprise, les maxima des variables d'états de mer ( $H_s$ ,  $T_p$ , etc) sont très corrélés entre eux (et à la première composante principale; voir l'axe 1 sur la figure 6.2) et sont peu corrélés avec le maximum du niveau d'eau (et donc à la seconde composante principale; voir l'axe 2 sur la figure 6.2). De plus, les deux premières composantes principales permettent d'expliquer environ 85% de la variance des données. Les tempêtes projetées dans l'espace engendré par les deux premières composantes principales

Évènement	Dégâts	Durée	Maximum					
			$H_s$	$T_p$	$T_{m10}$	P	$R_{2\%}$	$\eta$
1	2	2	8.4	16.6	13.0	539.2	4.3	4.6
2	0	1	6.3	15.0	12.6	278.5	3.3	4.6
3	0	2	4.9	11.8	9.9	120.3	2.3	4.5
4	1	3	7.3	16.8	13.45	422.4	4.0	4.7
5	1	6	5.3	13.4	11.3	177.2	2.8	4.9
6	0	6	4.9	13.4	11.6	156.0	2.7	4.0
7	0	2	3.6	13.4	11.7	79.5	2.2	4.5
8	0	2	6.8	13.8	11.1	287.3	3.2	4.8
9	0	1	6.5	13.1	10.8	256.0	3.0	4.2
10	0	2	7.4	16.2	12.7	403.5	4.0	3.7
11	0	2	8.0	15.7	12.6	465.4	4.0	4.3
12	1	2	7.1	18.6	15.7	467.6	4.5	4.5
13	0	2	8.2	15.1	12.1	476.9	4.0	4.4
14	1	5	6.6	19.4	17.6	436.8	4.5	4.4
Martin	0	4	6.7	13.6	11.3	280.3	3.1	4.3
16	0	4	7.1	14.7	12.15	346.7	3.5	4.1
17	0	2	3.6	15.2	13.6	101.5	2.6	4.0
18	0	2	3.3	11.7	10.2	62.3	1.9	4.0
Klaus	0	2	7.5	13.9	11.1	348.2	3.4	4.1
20	2	2	7.4	16.3	13.4	435.7	4.0	4.8
Quirin	0	2	7.3	19.5	16.5	505.0	4.7	4.2
22	0	5	5.0	14.2	12.9	132.2	2.6	4.8
23	0	5	6.8	16.9	13.6	306.8	3.4	4.2
24	0	5	5.5	16.2	13.6	243.0	3.4	4.3
25	0	5	5.2	13.3	11.3	175.3	2.8	4.9
Dirk	0	3	5.1	15.5	13.3	189.0	3.1	3.8
Hercules	2	4	7.7	20.9	17.9	597.8	5.2	4.8
Nadja	2	2	7.4	18.4	15.1	480.6	4.5	5.0
Andrea	0	5	6.7	14.5	12.3	313.0	3.4	5.0
Christine	2	3	7.9	17.2	13.7	500.5	4.4	5.0

TABLEAU 6.1 – Maxima de chaque variable d'aléa pour chaque évènement répertorié lors de la recherche historique décrite dans le chapitre 5. Lorsque le nom de la tempête est connue, il est utilisé comme identifiant de l'évènement.

sont représentées dans la figure 6.3. Comme nous pouvons le constater, les tempêtes dont l'indice de dégâts est égal à 1 ou 2 sont caractérisées par de fortes valeurs (par rapport à la moyenne des 30 tempêtes) des maxima des variables d'aléa ou du niveau d'eau. Étant donnée l'interprétation des composantes principales donnée ci-dessus, cela suggère qu'il devrait être possible d'obtenir des règles simples, sur la base de seuils, discriminant entre tempêtes à dégâts et autres évènements.

Les résultats de l'ACP effectuée sur le tableau 6.2 ainsi que sur la jointure des tableaux 6.1 et 6.2 sont similaires. Comme nous le verrons dans la section 6.1.3.i, cela nous a amené à considérer, entre autres, des règles ne faisant intervenir qu'une

Évènement	Moyennes						
	Durée	$H_s$	$T_p$	$T_{m10}$	P	$R_{2\%}$	$\eta$
1	2	7.3	15.6	12.6	394.0	3.8	4.4
2	1	5.9	14.8	12.4	251.1	3.2	4.4
3	2	3.9	11.0	9.2	78.2	2.0	4.2
4	3	5.9	14.8	11.9	258.1	3.2	4.5
5	6	3.4	11.7	9.8	70.2	2.0	4.5
6	6	3.2	12.6	10.8	65.9	2.0	3.6
7	2	3.5	13.0	10.9	75.1	2.2	4.2
8	2	6.1	13.1	10.6	221.0	2.9	4.6
9	1	6.3	13.0	10.8	237.3	2.9	4.0
10	2	6.8	15.4	12.4	334.5	3.6	3.6
11	2	6.9	14.4	11.8	337.1	3.4	4.2
12	2	6.0	16.6	14.3	330.2	3.7	4.3
13	2	6.7	13.6	11.2	304.8	3.2	4.2
14	5	4.3	15.4	13.6	166.1	2.9	4.1
Martin	4	4.2	12.4	10.4	123.5	2.3	3.8
16	4	5.1	12.8	10.6	180.2	2.6	3.9
17	2	3.1	14.1	12.5	69.0	2.2	3.8
18	2	2.6	10.8	9.4	35.3	1.6	3.7
Klaus	2	5.7	13.6	10.8	201.5	2.9	3.9
20	2	6.6	15.0	12.5	320.7	3.5	4.4
Quirin	2	5.5	17.3	14.9	286.6	3.7	4.0
22	5	3.0	13.2	11.4	60.1	2.0	4.6
23	5	6.0	14.6	12.1	254.7	3.2	4.0
24	5	4.2	14.4	12.3	132.9	2.6	4.1
25	5	3.3	11.8	9.7	66.5	1.9	4.5
Dirk	3	4.7	14.5	12.7	165.3	2.8	3.7
Hercules	4	5.6	16.4	14.0	285.4	3.5	4.3
Nadja	2	5.5	15.4	12.9	272.4	3.3	4.7
Andrea	5	4.6	13.8	11.7	155.4	2.7	4.4
Christine	3	5.6	15.0	12.2	253.9	3.2	4.6

TABLEAU 6.2 – Moyennes de chaque variable d'aléa pour chaque évènement répertorié lors de la recherche historique décrite dans le chapitre 5. Lorsque le nom de la tempête est connue, il est utilisé comme identifiant de l'évènement.

variable résumant l'état de mer (vue la forte corrélation entre ces dernières) et le niveau d'eau.

### 6.1.3 Modèles et règles de discrimination

En partant des tableaux **STORMS** construits précédemment, deux approches ont été considérées pour tenter de discriminer les tempêtes à dommages des autres évènements répertoriés. La première approche a simplement consisté à rechercher

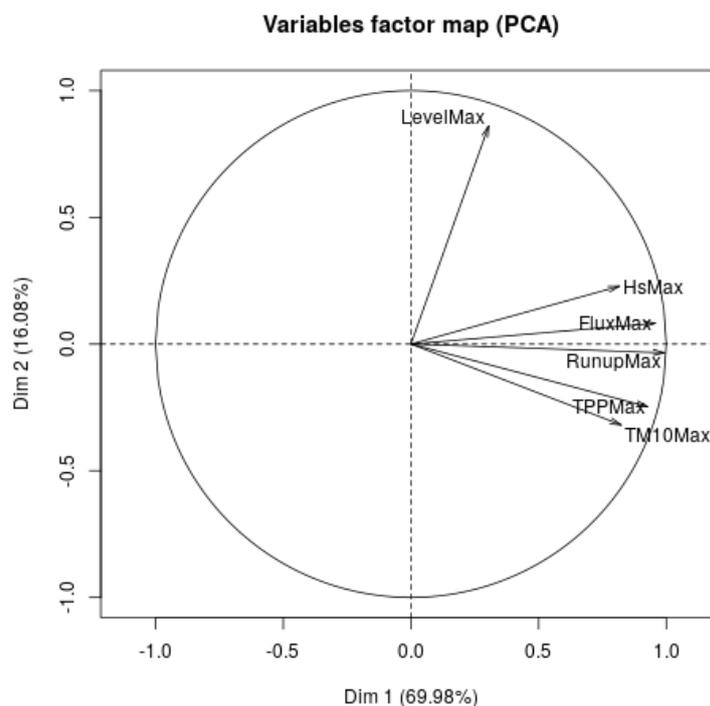


FIGURE 6.2 – Cercle des corrélations obtenu après analyse en composantes principales des maxima des variables d'aléa des tempêtes répertoriées entre 1949 et 2015 pour la Grande Plage de Biarritz. Le maximum de  $P$  (respectivement,  $\eta$ ) est noté FluxMax (respectivement, LevelMax). La notation est sans ambiguïté pour  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{m10}$  et  $R_{2\%}$ .

des seuils dans l'espace engendré par les variables d'aléa résumées permettant de séparer les tempêtes à dommages des autres évènements. La deuxième approche, similaire de par sa nature, a reposé sur l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage d'arbre de décision. Avant de présenter les résultats, il nous semble important de rappeler que les indices de dommages introduits au chapitre précédent résultent d'une interprétation subjective de documents historiques, eux-même rapportant les évènements avec subjectivité.

### 6.1.3.i Règles de discrimination à base de seuils

L'ACP réalisée dans la section 6.1.2 a mis en évidence une forte corrélation linéaire entre les différentes variables d'état de mer résumées et une faible corrélation de ces dernières avec le niveau d'eau résumé. Cela nous a conduit, dans un premier temps, à représenter les tempêtes dans les plans engendrés par une variable d'état de mer résumée et le niveau d'eau résumé. Par exemple, le panneau de gauche de la figure 6.4 représente les tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  maximum (en abscisse) et du maximum de la variable  $H_s$  durant la tempête (en ordonnée). Remarquons, au passage, que les deux variables n'atteignent pas forcément leur maxima simultanément pendant l'évènement. Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges

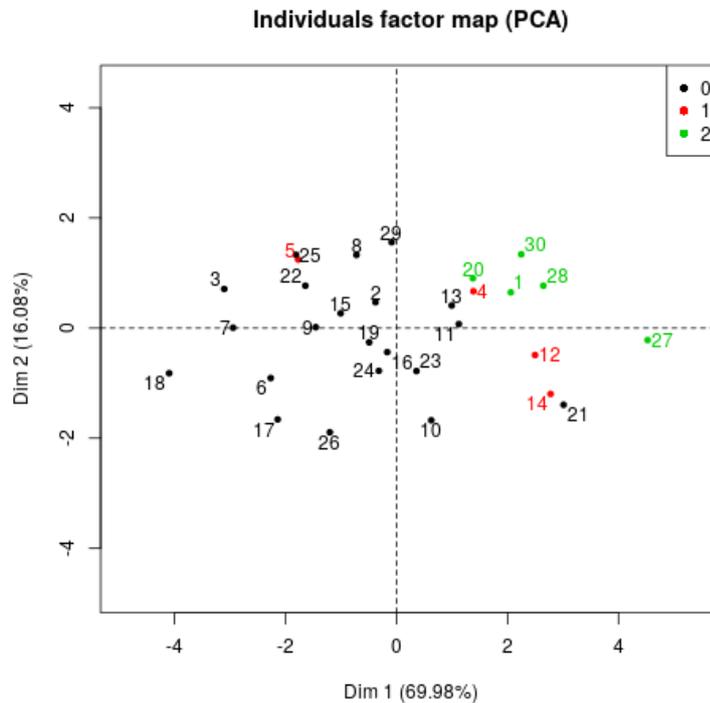


FIGURE 6.3 – Projections des tempêtes répertoriées entre 1949 et 2015 pour la Grande Plage de Biarritz sur le plan engendré par les deux premières composantes principales après analyse en composantes principales des maxima des variables d'aléa. Les couleurs correspondent à l'indice de dégâts attribué par la recherche historique.

correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. Le panneau de droite de la figure 6.4 représente un graphique similaire lorsque les maxima sont remplacés par des moyennes. Les figures 6.5, 6.6 et 6.7 correspondent aux cas où  $H_s$  est remplacé par  $T_p$ ,  $P$  et  $R_{2\%}$ , respectivement. Notons que l'utilisation de la période énergétique  $T_{m10}$  donne des résultats très similaires à ceux de la période pic  $T_p$  présentés dans la figure 6.5, mais avec une discrimination des événements un peu moins bonne (et ne seront donc pas présentés ici).

En inspectant par exemple le panneau de gauche de la figure 6.4, on peut constater que toutes les tempêtes à dégâts (sauf deux dont une pour laquelle la présence de dégâts a été jugée peu fiable) se retrouvent dans le coin supérieur droit. La séparation semble moins évidente si l'on utilise les moyennes, comme on peut le constater à partir du panneau droit. En regardant les figures 6.5, 6.6 et 6.7, il semble que l'utilisation des maxima permet généralement une meilleure discrimination des tempêtes sans dégâts des tempêtes avec dégâts.

En revenant au panneau gauche de la figure 6.4, il apparaît clairement que si l'on applique le critère  $\max H_s > 7 \text{ m}$  et  $\max \eta > 4.5 \text{ m}$ , il est facile de distinguer les événements responsables de dommages des événements sans dégâts. En procédant de façon similaire à partir des panneaux de gauche des autres figures, nous avons identifié en tout quatre règles de discrimination permettant d'isoler correctement

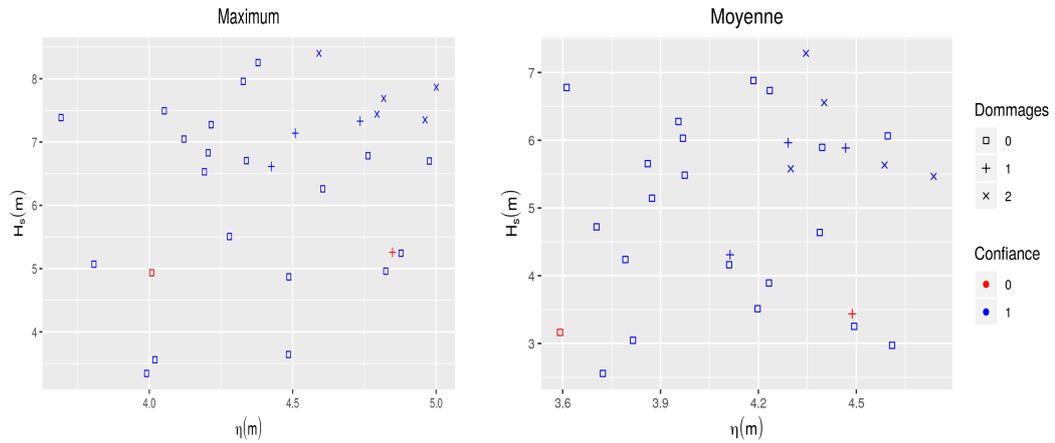


FIGURE 6.4 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d’eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) de  $H_s$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l’indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l’indice de dégâts est faible.

les tempêtes à dégâts :

- R1** :  $\max H_s > 7 \text{ m}$  et  $\max \eta > 4.5 \text{ m}$  (figure 6.4) ;
- R2** :  $\max T_p > 16 \text{ s}$  et  $\max \eta > 4.4 \text{ m}$  (figure 6.5) ;
- R3** :  $\max P > 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $\max \eta > 4.42 \text{ m}$  (figure 6.6) ;
- R4** :  $R_{2\%} > 4 \text{ m}$  et  $\max \eta > 4.4 \text{ m}$  (figure 6.7).

Des règles similaires peuvent être proposées pour distinguer les évènements d’intensité 1 et 2, sauf dans le cas où la variable d’état de mer sélectionnée est la période pic  $T_p$  car, comme on peut le voir sur la figure 6.5, les évènements d’intensité 1 et 2 sont très mélangés.

En complément des règles précédentes, nous nous sommes également intéressés au *niveau d’eau total*, que nous définissons comme la somme du run-up  $R_{2\%}$  et du niveau d’eau  $\eta$ . Cette valeur, appelé *Total Water Level (TWL)* en anglais (voir la figure 2.5), a été utilisée comme prédicteur de l’intensité de submersion dans [50]. Intuitivement, cette variable considérée seule devrait être suffisante pour discriminer les évènements à dégâts des évènements sans dégâts. En complément de celle-ci, nous avons également utilisé la direction moyenne des vagues  $\theta_m$  lors des tempêtes (voir section 2.4.1.iii) afin d’évaluer son pouvoir discriminant. Le panneau de gauche de la figure 6.8 représente les tempêtes en fonction de la moyenne de  $\theta_m$  (en abscisse) et du maximum de  $R_{2\%} + \eta$  (en ordonnée) durant l’évènement. Comme nous pouvons le constater, le maximum du niveau d’eau total pendant un évènement apparaît comme une variable permettant de bien discriminer les tempêtes à dégâts des autres évènements. Encore une fois, lorsque le maximum est remplacé par la moyenne, la discrimination est moins bonne. En revanche, il apparaît clairement à partir de la figure 6.8 que la prise en compte de la direction moyenne des

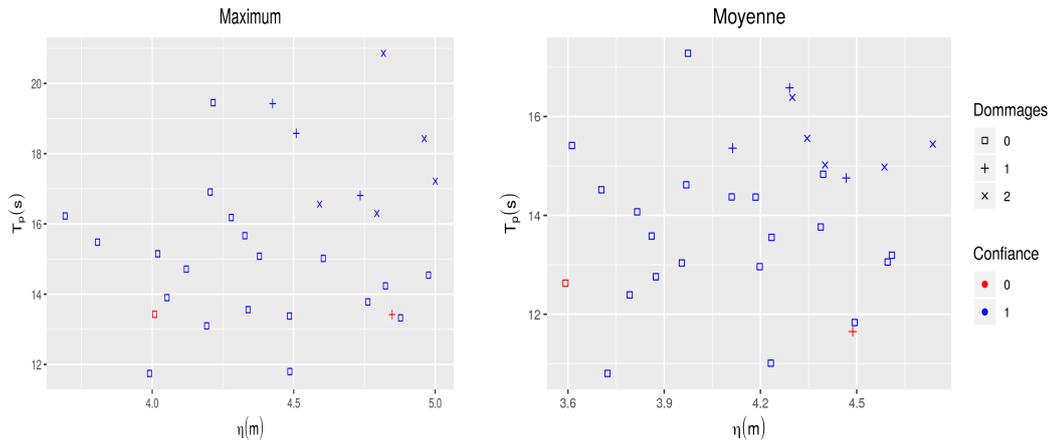


FIGURE 6.5 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) de  $T_p$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

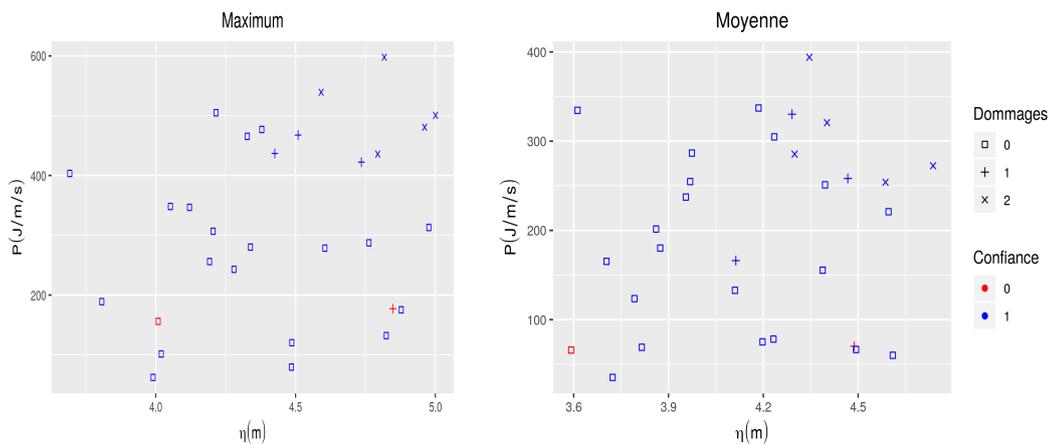


FIGURE 6.6 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) du flux  $P$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

vagues durant la tempête ne permet pas mieux d'expliquer les dégâts. Cela nous a ainsi conduit à considérer la règle de discrimination simple suivante ne faisant intervenir que le niveau d'eau total :

**R5** :  $\max(\eta + R_{2\%}) > 8.4 \text{ m}$  (figure 6.8).

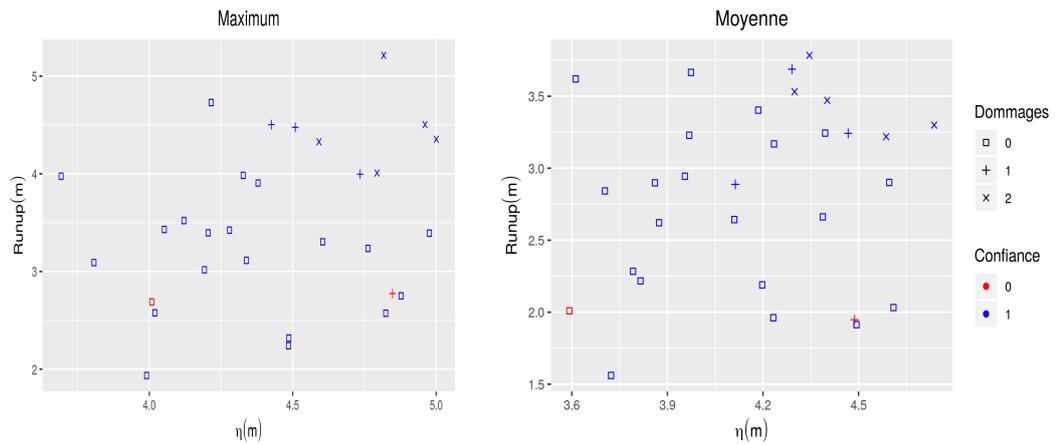


FIGURE 6.7 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) de  $R_{2\%}$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

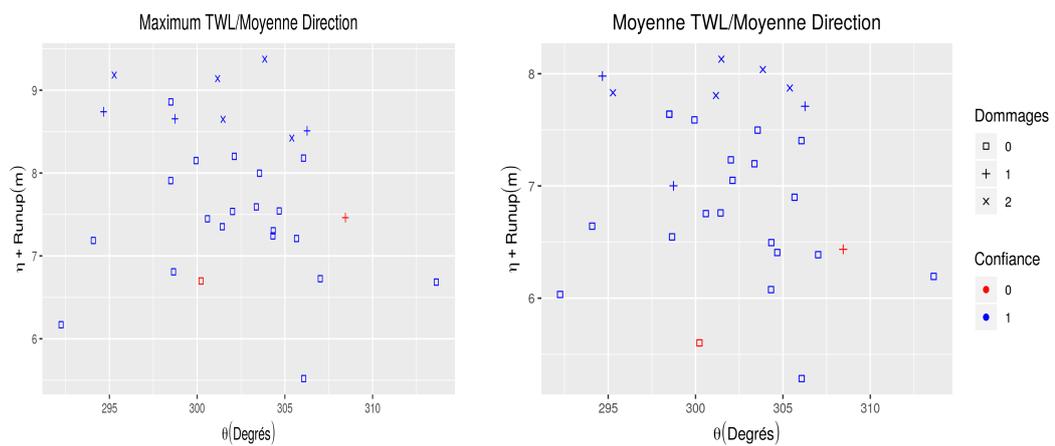


FIGURE 6.8 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau total  $\eta + R_{2\%}$ , appelé *Total Water Level* (TWL) en anglais (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur de la moyenne de  $\theta_m$  (dans les deux panneaux). Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

Lorsque l'on décrit des tempêtes par plusieurs maxima, il est clair que ces maxima ne sont pas forcément simultanés. Par exemple, le maximum atteint par  $\eta$  durant la tempête n'est pas forcément observé en même temps que le maximum de  $H_s$ . Cela nous a conduit à nous intéresser à la valeur d'une variable d'aléa lorsqu'une autre variable d'aléa prend sa valeur maximale. Par exemple, le panneau de gauche de la figure 6.9 représente les tempêtes décrites par leurs valeurs de  $P$  (en ordonnée)

quand  $\eta$  est maximum (en abscisse) et le panneau de droite représente ces mêmes tempêtes décrites par leurs valeurs de  $\eta$  (en abscisse) quand  $P$  est maximum (en ordonnée). De graphiques similaires ont été réalisés avec d'autres variables d'aléa mais celui de la figure 6.9 apparaît comme le plus intéressant.

En inspectant le panneau gauche de la figure 6.9, on constate que la distinction entre évènements avec et sans dégâts est difficile à réaliser. Par exemple, on remarque quatre évènements de catégorie 1 ou 2 qui ont un flux peu élevé par rapport aux autres tempêtes ( $P < 100 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  au moment du maximum du niveau d'eau). De plus, plusieurs évènements de catégorie 0 ont un flux très élevé et même supérieur à des évènements de catégorie 1 ou 2 au moment du maximum du niveau d'eau. En revanche, en inspectant le panneau droit de la figure 6.9, on constate que la distinction entre évènements avec et sans dégâts est bien meilleure avec le critère  $\max P > 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $\eta$  au maximum de  $P > 4 \text{ m}$  (même si trois évènements catégorisés 0 lors de la recherche historique se mélangent aux évènements à dégâts). Remarquons également que la tempête Hercules (la  $\times$  ayant le flux le plus élevé) est caractérisée par un niveau d'eau inférieur à 4 mètres au moment de son pic de flux. Néanmoins, si on regarde les valeurs des variables d'aléa pour cet évènement en détails, on constate qu'il existe une date durant la tempête Hercules pour laquelle le flux et le niveau d'eau sont élevés en même temps ( $\eta = 4.1 \text{ m}$  et  $P = 550.1 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

L'analyse précédente peut se traduire empiriquement de la façon suivante : pendant un évènement de tempête, quand le flux énergétique est important (supérieur à  $400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) et s'il est transmis vers le littoral par un niveau d'eau suffisamment haut (supérieur à 4 mètres), l'évènement sera potentiellement responsable de dommages. En d'autres termes, le dépassement de ces seuils de manière simultanée est plutôt représentatif d'un évènement à dommages.

Intéressons-nous maintenant à une autre manière de rendre compte du caractère élevé d'une valeur  $v$  d'une variable d'aléa  $V$  pour une tempête. Soient  $N$  le nombre de dates (lignes) du tableau **ALEA** (voir section 6.1.1) contenant la série temporelle des variables d'aléa de 1949 à 2015 (et rappelons que  $N$  est environ égal à 48 000). Notons  $v_1, \dots, v_N$  les valeurs prises par  $V$  dans **ALEA**. L'importance de la valeur  $v$  de  $V$  peut être quantifiée par la rang de  $v$  parmi  $v_1, \dots, v_N$  divisé par  $N$ , ou, de façon équivalente, par la proportion de  $v_1, \dots, v_N$  inférieurs à  $v$ . Notons  $\hat{F}_N^V$  la fonction de répartition empirique de  $V$  calculée à partir des valeurs  $v_1, \dots, v_N$ . Ainsi, par définition,

$$\hat{F}_N^V(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{1}(v_i \leq x), \quad x \in \mathbb{R},$$

et la proportion de  $v_1, \dots, v_N$  inférieurs à  $v$  est simplement donnée par  $\hat{F}_N^V(v)$ . En conséquence, plus la valeur de  $v$  sera proche de sa valeur maximale, plus  $\hat{F}_N^V(v)$  sera proche de 1.

Afin d'obtenir un indicateur  $I$  permettant d'identifier les dates auxquelles le niveau d'eau  $\eta$  et le flux  $P$  prennent simultanément des valeurs élevées, nous avons alors procédé comme suit : soient  $(\eta_1, P_1), \dots, (\eta_N, P_N)$  les valeurs prises par  $(\eta, P)$

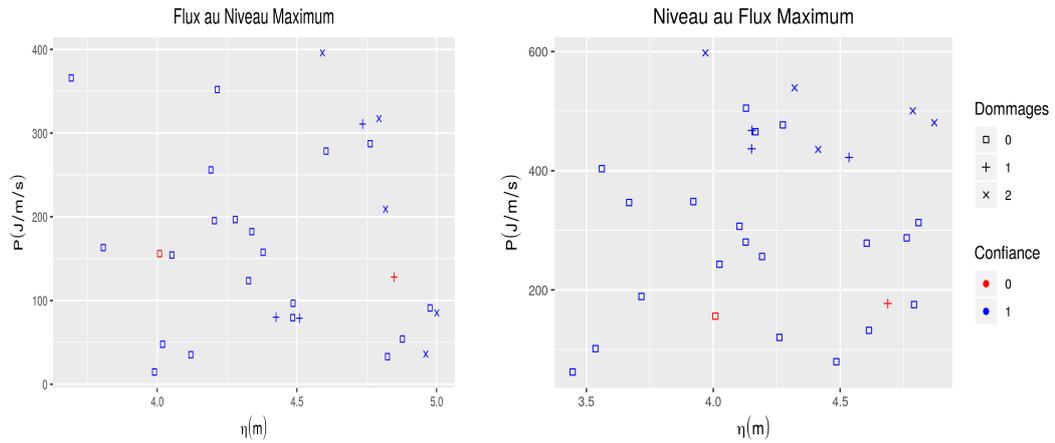


FIGURE 6.9 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  et de la valeur du flux  $P$ . Le panneau de gauche représente les tempêtes décrites par leurs valeurs de  $P$  (en ordonnée) quand  $\eta$  est maximum (en abscisse). Le panneau de droite représente les tempêtes décrites par leurs valeurs de  $\eta$  (en abscisse) quand  $P$  est maximum (en ordonnée). Les maxima sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

dans **ALEA**; les valeurs de  $I$  ont alors été calculées par :

$$I_i = \hat{F}_N^\eta(\eta_i) \times \hat{F}_N^P(P_i). \quad (6.1)$$

Ainsi, plus  $\eta_i$  et  $P_i$  prennent simultanément des valeurs proches de leurs maxima, plus  $I_i$  sera proche de 1.

À partir de l'indicateur  $I$  dont les valeurs sont données par la formule (6.1), nous avons calculé le maximum de  $I$  pour chaque tempête identifiée lors de la recherche historique documentaire. Le panneau gauche de la figure 6.10 représente les tempêtes en fonction du maximum de  $I$  (en abscisse) et de la moyenne de la direction  $\theta_m$  (en ordonnée) calculés sur la durée de chaque évènement. Comme nous pouvons le constater, toutes les tempêtes avec dommages se retrouvent sur le côté droit du graphique, et, comme précédemment, la direction moyenne des vagues ne semble avoir aucun pouvoir discriminant. Le panneau droit de la figure 6.10 représente les tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  au maximum de  $I$  (en abscisse) et du flux  $P$  au maximum de  $I$  (en ordonnée). Globalement, les évènements de catégorie 1 et 2 se distinguent des évènements de catégorie 0. Cependant, deux évènements de catégorie 1 ou 2 présentent des valeurs de flux plutôt basses au moment du maximum de  $I$ . Les deux évènements en question sont les tempêtes 20 et Hercules dans le tableau 6.1. De même, que pour la tempête Hercules (comme évoqué précédemment), la tempête 20 est caractérisée par des valeurs simultanées du flux et du niveau d'eau supérieures aux seuils de  $4 \text{ m}$  et  $400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , respectivement. Cela est la conséquence du fait que le produit  $I$  est difficile à utiliser à cause de l'étendue des valeurs de flux. En effet, des valeurs de flux de l'ordre de  $100 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  semblent faibles à l'échelle des tempêtes répertoriées mais restent exceptionnelles sur l'in-

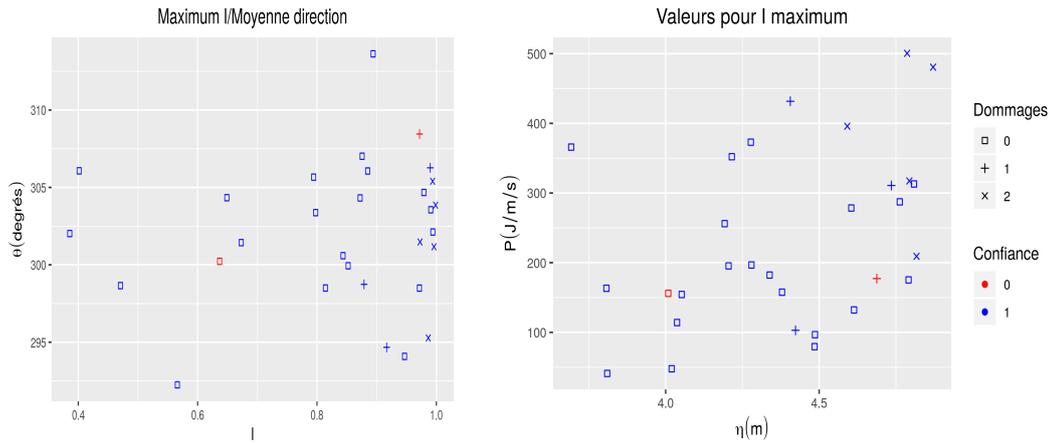


FIGURE 6.10 – Le panneau gauche représente les tempêtes en fonction du maximum de  $I$  (en abscisse) et de la moyenne de la direction  $\theta_m$  (en ordonnée) calculés sur la durée de chaque évènement. Le panneau droit représente les tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  au maximum de  $I$  (en abscisse) et du flux  $P$  au maximum de  $I$  (en ordonnée). Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

tégralité du jeu de données **ALEA**, d'où des valeurs de  $I$  associées élevées. Cet effet rend la figure 6.9 difficile à interpréter.

L'analyse des figures 6.9 et 6.10, élaborées pour tenir compte de la simultanéité des valeurs de  $\eta$  et  $P$ , suggèrent ainsi une nouvelle règle de discrimination :

**R6** :  $P > 400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\eta > 4 \text{ m}$  à la même date.

### 6.1.3.ii Arbres de décision

L'approche qui consiste à rechercher des règles de discriminations à seuils est à la base des méthodes de modélisation par arbres de décision de type CART (*Classification and Regression Trees*) proposées dans [41]. Appliquées à nos données, ces méthodes permettent de rechercher, lors de la phase d'apprentissage, la meilleure façon de séparer à l'aide de seuils les tempêtes à dommages des évènements sans dégâts. Une fois estimé, le modèle prend la forme d'un arbre de décision (qui peut être traduit en règles similaires à celles données dans la section précédente). Lors de la phase d'apprentissage les variables d'aléa jouent le rôle de variables *explicatives* et l'indice de dommages le rôle de variable *à expliquer*. L'algorithme procède de manière récursive et n'utilise qu'une seule variable d'aléa par étape. La variable est choisie de par sa faculté de discrimination. Sous R [65], le package `rpart` permet d'estimer un arbre à partir d'*exemples d'apprentissage*.

Dans notre cas, les exemples d'apprentissage sont donnés par les lignes de la jointure des tableaux **STORMS** décrivant chaque évènement par les maxima et moyennes (sur la durée de l'évènement) de chaque variable d'aléa (soit 12 variables au total). Nous avons décidé de retirer la tempête 5 d'intensité 1 (voir tableau 5.1) des

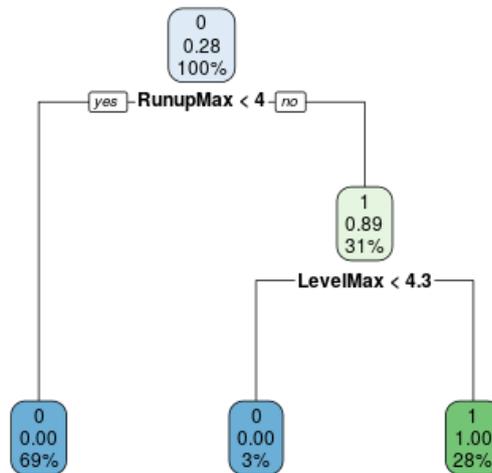


FIGURE 6.11 – Arbre de décision estimé à partir de la jointure des tableaux **STORMS** permettant de prédire la présence (codée par un 1 – dommages d'intensité 1 ou 2) ou l'absence (codée par un 0 – dommages d'intensité 0) de dégâts. Les maxima et moyennes des variables d'aléa sont calculés sur les durées des 30 tempêtes répertoriées durant la recherche historique entre 1949 et 2015.

exemples d'apprentissage car son niveau de dommages n'a pas un bon niveau de confiance. Dans un premier temps, nous n'avons pas tenu compte de la distinction entre événements à dommages d'intensité 1 et 2. En d'autres termes, nous avons uniquement essayé d'obtenir un arbre de décision pour prédire la présence ou l'absence de dégâts. L'arbre de décision obtenu est représenté dans la figure 6.11. Cet arbre contient seulement deux tests  $\max R_{2\%} < 4 m$  et  $\max \eta > 4.3 m$  et se traduit par les trois règles de discrimination suivantes :

- A1** SI  $\max R_{2\%} < 4 m$  ALORS Indice de dégâts = 0;
- A2** SI  $\max R_{2\%} \geq 4 m$  ET  $\max \eta < 4.3 m$  ALORS Indice de dégâts = 0;
- A3** SI  $\max R_{2\%} \geq 4 m$  ET  $\max \eta \geq 4.3 m$  ALORS Indice de dégâts  $\in \{1, 2\}$ .

L'interprétation des rectangles de couleur (voir l'aide de la fonction `rpart` de R [65]) montre qu'il s'agit d'un arbre d'erreur d'apprentissage nulle. De façon assez rassurante, nous voyons que cet arbre est très similaire à la règle **R4** obtenue dans la section précédente à l'aide de graphiques.

Nous avons ensuite tenté d'estimer un arbre de décision pour distinguer, cette fois-ci, les trois niveaux de dommages. En d'autres termes, les événements d'intensité 1 et les événements d'intensité 2 sont considérés comme des événements de catégories distinctes. L'arbre obtenu est représenté dans la figure 6.12. Cet arbre

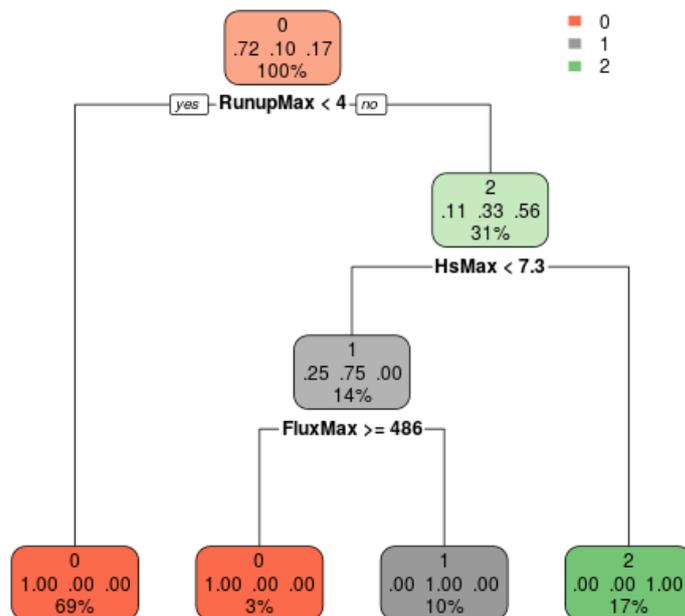


FIGURE 6.12 – Arbre de décision obtenu pour les maxima et moyennes des variables d'aléa calculés sur les durées des 30 tempêtes relevées par la recherche historique entre 1949 et 2015.

contient trois tests  $\max R_{2\%} < 4 \text{ m}$ ,  $\max H_s < 7.3 \text{ m}$  et  $\max P \geq 486 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ . L'interprétation des rectangles de couleur montre, une nouvelle fois, qu'il s'agit d'un arbre d'erreur d'apprentissage nulle. Il se traduit par les quatre règles de discrimination suivantes :

- A1'** SI  $\max R_{2\%} < 4 \text{ m}$  ALORS Indice de dégâts = 0;
- A2'** SI  $\max R_{2\%} \geq 4 \text{ m}$  ET  $\max H_s < 7.3 \text{ m}$  ET  $\max P \geq 486 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  ALORS Indice de dégâts = 0;
- A3'** SI  $\max R_{2\%} \geq 4 \text{ m}$  ET  $\max H_s < 7.3 \text{ m}$  ET  $\max P < 486 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  ALORS Indice de dégâts = 1;
- A4'** SI  $\max R_{2\%} \geq 4 \text{ m}$  ET  $\max H_s \geq 7.3 \text{ m}$  ALORS Indice de dégâts = 2.

Comme on peut le voir, l'arbre ne fait pas intervenir le niveau d'eau, ce qui, au vue de l'analyse effectuée dans les sections précédentes, paraît contre-intuitif. De plus, la façon dont l'arbre distingue les tempêtes d'intensité 1 des tempêtes d'intensité 0 (règles **A2'** et **A3'**) va à l'encontre du bon sens physique. Nous attribuons ces déficiences du modèle à un phénomène de *sur-apprentissage* dû notamment au manque de fiabilité que l'on peut accorder à l'indice de dégâts et au faible nombre d'exemples d'apprentissage (29).

D'autres méthodes d'analyses de données, comme des réseaux bayésiens, peuvent être envisagées pour appréhender de manière plus précise les règles de détection d'événements. Cependant, ce travail repose sur une approche exploratoire de don-

nées océaniques sur un espace et une durée limités et des données de dégâts qui proviennent d'une étude d'archives. Ainsi, dans un premier temps il n'a pas semblé nécessaire de tester tous les algorithmes existants.

### 6.1.4 Validation des règles

Dans les sections précédentes, nous avons obtenu, dans un premier temps, six règles de discrimination simples, puis, dans un deuxième temps, deux arbres de décision. Pour les raisons évoquées précédemment, le second arbre de décision, donné dans la figure 6.12, n'a pas été jugé comme un modèle pertinent. Dans la mesure où le premier arbre représenté dans la figure 6.11 est très similaire à l'une des six règles obtenues sur la base d'analyses graphiques, il ne constitue pas un modèle de discrimination supplémentaire.

En résumé, les six règles retenues permettant de discriminer entre tempêtes à dégâts et évènements sans dommages sont les suivantes :

- R1** :  $\max H_s > 7 m$  et  $\max \eta > 4.5 m$  (figure 6.4) ;
- R2** :  $\max T_p > 16 s$  et  $\max \eta > 4.4 m$  (figure 6.5) ;
- R3** :  $\max P > 400 J.m^{-1}.s^{-1}$  et  $\max \eta > 4.42 m$  (figure 6.6) ;
- R4** :  $R_{2\%} > 4 m$  et  $\max \eta > 4.4 m$  (figure 6.7 et arbre de la figure 6.11) ;
- R5** :  $\max(\eta + R_{2\%}) > 8.4 m$  (figure 6.8) ;
- R6** :  $P > 400 J.m^{-1}.s^{-1}$  et  $\eta > 4 m$  à la même date (figures 6.9 et 6.10) ;

où, rappelons-le, les maxima sont calculés sur la durée des évènements et que les valeurs de variables d'aléa ne sont considérées qu'aux maxima locaux du niveau d'eau.

La première question qui s'est naturellement posée a été de savoir comment utiliser ces règles pour détecter des tempêtes à dommages à partir des seules valeurs des variables d'aléa aux maxima locaux du niveau d'eau au large de Biarritz. En effet, la plupart des règles ci-dessus (sauf **R5** et **R6**) utilisent deux maxima (non nécessairement simultanés) de ces variables sur la durée d'un évènement. Or, si l'on se trouve à une date  $t$  correspondant à un maximum local du niveau d'eau et que l'on cherche à décider si cette date fait partie d'un évènement à dommages, la durée de ce dernier ne peut pas être connue. Pour remédier à cela, nous avons considéré des versions des règles **R1** à **R4** utilisant un retard maximum  $\tau \geq 0$  représentant le nombre de dates (correspondant à des maxima locaux du niveau d'eau) précédant la date courante  $t$  sur lesquelles les maxima des variables d'aléa doivent être calculés. Dans la suite,  $H_s(t)$  représente la valeur de  $H_s$  à la date  $t$  et, de façon similaire, pour  $T_p$ ,  $P$ ,  $R_{2\%}$  et  $\eta$ . De plus, pour  $i \in \{1, \dots, \tau\}$ ,  $t_{-i}$  représente la  $i$ -ème date précédant  $t$  correspondant à un maximum local du niveau d'eau. Les versions à retard suivantes des règles **R1** à **R4** ont été considérées :

- R1**( $t, \tau$ ) :  $\max\{H_s(t), H_s(t_{-1}), \dots, H_s(t_{-\tau})\} > 7 m$   
et  $\max\{\eta(t), \eta(t_{-1}), \dots, \eta(t_{-\tau})\} > 4.5 m$  ;

**R2**( $t, \tau$ ) :  $\max\{T_p(t), T_p(t_{-1}), \dots, T_p(t_{-\tau})\} > 16 \text{ s}$   
 et  $\max\{\eta(t), \eta(t_{-1}), \dots, \eta(t_{-\tau})\} > 4.4 \text{ m}$ ;

**R3**( $t, \tau$ ) :  $\max\{P(t), P(t_{-1}), \dots, P(t_{-\tau})\} > 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$   
 et  $\max\{\eta(t), \eta(t_{-1}), \dots, \eta(t_{-\tau})\} > 4.42 \text{ m}$ ;

**R4**( $t, \tau$ ) :  $\max\{R_{2\%}(t), R_{2\%}(t_{-1}), \dots, R_{2\%}(t_{-\tau})\} > 4 \text{ m}$   
 et  $\max\{\eta(t), \eta(t_{-1}), \dots, \eta(t_{-\tau})\} > 4.4 \text{ m}$ .

Ainsi, pour un  $\tau$  fixé et une règle **Ri**( $t, \tau$ ),  $i \in \{1, \dots, 4\}$ , la date  $t$  sera alors considérée comme faisant partie d'une tempête à dégâts si la condition **Ri**( $t, \tau$ ) est satisfaite. La valeur de  $\tau$  s'interprète comme le nombre de cycles de marées précédent la date  $t$  à considérer. Avec les notations précédentes, les règles **R5** et **R6** ne faisant pas intervenir deux maxima non nécessairement simultanés s'écrivent simplement comme :

**R5**( $t$ ) :  $\eta(t) + R_{2\%}(t) > 8.4 \text{ m}$ ;

**R6**( $t$ ) :  $P(t) > 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $\eta(t) > 4 \text{ m}$ .

Afin de valider les règles, nous les avons appliquées avec  $\tau \in \{2, 3, 4, 8\}$  sur la série temporelle **ALEA**. Une règle **Ri**( $t, \tau$ ),  $i \in \{1, \dots, 4\}$ , ou **Ri**( $t$ ),  $i \in \{5, 6\}$ , est d'autant meilleure qu'elle permet de retrouver un grand nombre d'évènements à dégâts identifiés lors de la recherche documentaire historique et peu d'évènements non répertoriés. Le tableau 6.3 résume les résultats obtenus pour  $\tau = 4$ . Par exemple, la ligne correspondant à la règle **R1**( $t, 4$ ) s'interprète comme suit : la règle **R1**( $t, 4$ ) a identifié 1 (respectivement, 2, 5) évènement(s) parmi les tempêtes de catégorie 0 (respectivement, 1, 2) ; de plus, elle a conduit à l'identification de 7 évènements non répertoriés lors de la recherche documentaire historique.

À partir du tableau 6.3, nous voyons que les 6 règles identifient globalement bien les évènements à dégâts répertoriés lors de la recherche documentaire historique, en particulier les évènements de catégorie 2. Concernant l'identification d'évènements non répertoriés, ces derniers sont dans l'état actuel des choses considérés comme des faux positifs. Idéalement, pour chacun de ces évènements potentiels, une campagne de recherche documentaire supplémentaire est nécessaire pour confirmer ou infirmer la présence de dégâts. Sous l'hypothèse où tous les évènements à dégâts entre 1949 et 2015 ont été correctement identifiés lors de la recherche historique, ce sont les règles **R3**( $t, 4$ ) et **R4**( $t, 4$ ) qui ont le plus faible taux de faux positifs, et la règle **R2**( $t, 4$ ) qui est la plus mauvaise. Sous cette même hypothèse, c'est globalement la règle **R3**( $t, 4$ ) qui a le meilleur comportement : non seulement, elle conduit à un faible nombre de faux positifs mais elle retrouve exactement tous les évènements de catégorie 1 ou 2.

La valeur  $\tau = 4$  est celle qui conduit globalement aux meilleurs résultats : lorsque  $\tau = 2$  ou 3, tous les évènements de catégorie 1 ou 2 ne sont pas correctement identifiés, alors que, lorsque  $\tau = 8$ , il y a un plus grand nombre de faux positifs.

Règle		Nombre d'évènements identifiés			
Num.	Variables	0	1	2	Non répertoriés
<b>R1(t,4)</b>	max $H_s$ , max $\eta$	1	2	5	7
<b>R2(t,4)</b>	max $T_p$ , max $\eta$	1	3	5	39
<b>R3(t,4)</b>	max $P$ , max $\eta$	0	4	5	5
<b>R4(t,4)</b>	max $R_{2\%}$ , max $\eta$	1	2	5	5
<b>R5(t)</b>	$R_{2\%} + \eta$	1	3	5	10
<b>R6(t)</b>	$P, \eta$	3	3	5	11

TABLEAU 6.3 – Résultats de la validation des règles pour  $\tau = 4$  sur la série temporelle **ALEA**. Pour chaque règle, le nombre d'évènements identifiés de catégorie 0, 1 ou 2 est donné ainsi que le nombre d'évènements non répertoriés durant la recherche documentaire historique. Rappelons que, lors de cette dernière, parmi les 30 évènements répertoriés, 21 (respectivement, 4, 5) étaient de catégorie 0 (respectivement, 1, 2). Le nombre de faux positifs s'obtient en additionnant les effectifs de la colonne "0" et de la colonne "Non répertoriés".

## 6.2 Application au calcul de périodes de retour d'évènements de submersion

Les règles obtenues dans la section précédente permettent de discriminer tempêtes à dommages et évènements sans dégâts. Sous l'hypothèse de stationnarité du phénomène aléatoire sous-jacent considérée à plusieurs reprises dans ce travail, il est également possible de se servir des règles obtenues pour quantifier le caractère exceptionnel ou non de certaines conditions océaniques rencontrées durant les évènements répertoriés. Nous allons illustrer cette démarche en utilisant les deux règles les plus simples, **R5(t)** et **R6(t)**, même si des calculs similaires peuvent être réalisés à partir des quatre autres règles.

### 6.2.1 Périodes de retour calculées à partir de la règle **R5(t)**

Rappelons que la règle **R5(t)** est donnée par :

$$\mathbf{R5}(t) : \eta(t) + R_{2\%}(t) > 8.4 \text{ m.}$$

À partir de la série temporelle **ALEA** de 48 000 observations environ (voir section 6.1.1) contenant les valeurs des variables d'aléa de 1949 à 2015 aux maxima locaux du niveau d'eau, l'objectif a été d'extraire les dates  $t$  pour lesquels  $\eta(t) + R_{2\%}(t)$  (aussi appelé TWL) était supérieure à un seuil élevé (proche de 8.4 m) et de modéliser la distribution de la variable aléatoire  $\eta + R_{2\%}$  au-dessus du seuil considéré (les variables aléatoires seront notées en gras dans cette section et la suivante) à l'aide d'une distribution de Pareto généralisée (en anglais, *Generalized Pareto distribution* – d'où l'utilisation de l'abréviation GPD dans la suite).

Notons  $u$  le seuil considéré. La fonction de répartition de la GPD est donnée par :

$$G_{u,\sigma,\xi}(x) = 1 - \left[ 1 + \xi \times \max\left(\frac{x-u}{\sigma}, 0\right) \right]^{-1/\xi}, \quad x \geq u, \quad (6.2)$$

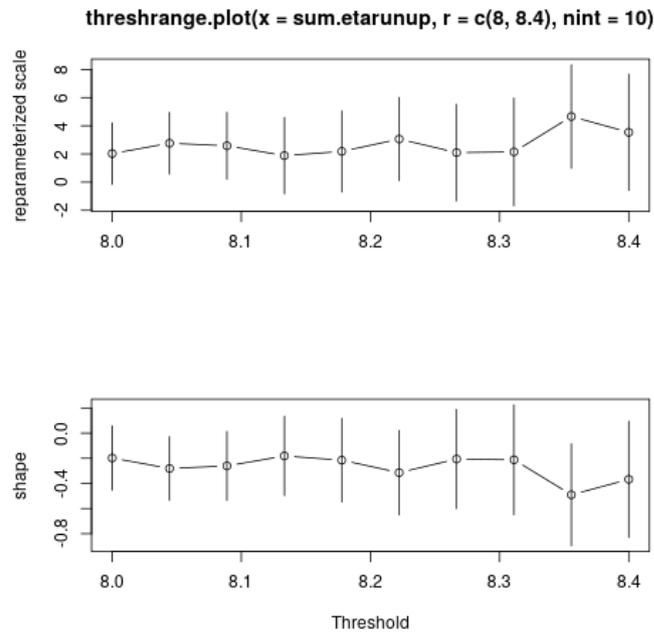


FIGURE 6.13 – Graphiques produits par le package R `extRemes` [21] donnant les estimations des paramètres de forme et d'échelle pour plusieurs valeurs de seuils lors de la modélisation de la distribution de  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$  à l'aide d'une GPD. L'heuristique souvent utilisée consiste à considérer un seuil dans le sous-intervalle pour lequel les estimations sont relativement stables.

où  $\sigma$  est appelé *paramètre de forme* et  $\xi$  *paramètre d'échelle*. Le choix de la GPD vient de la théorie des valeurs extrêmes qui prédit qu'une GPD devrait être un bon modèle pour modéliser les valeurs d'une série au-dessus d'un seuil élevé (voir par exemple [55]). La pratique usuelle de la modélisation à l'aide de la GPD (voir par exemple [21]) consiste à considérer plusieurs valeurs de seuils dans un intervalle et à examiner la stabilité des estimations correspondantes des paramètres de forme et d'échelle. Nous avons réalisé ceci automatiquement à l'aide du package R `extRemes` [21]. Les résultats sont donnés dans la figure 6.13. L'heuristique souvent utilisée en modélisation des valeurs extrêmes nous a conduit à choisir la valeur de 8.3  $m$  qui est à la fois proche du seuil de 8.4  $m$  utilisé dans la règle et se trouve dans l'intervalle pour lequel les estimations de  $\sigma$  et  $\xi$  sont relativement stables.

Avec la valeur  $u = 8.3 m$ , nous avons obtenu les estimations  $\hat{\sigma} = 0.4175$  et  $\hat{\xi} = -0.2581863$ . Le panneau gauche de la figure 6.14 donne le diagramme quantiles-quantiles suggérant une adéquation correcte entre quantiles empiriques et quantiles obtenus à l'aide de la fonction quantile  $G_{u, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Le panneau de droite confirme ce diagnostic en procédant à des simulations comme expliqué dans [21].

La fonction de répartition  $G_{u, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}$  nous permet alors de calculer les *périodes de retour* d'événements caractérisés par la condition  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%} > x$ , pour  $x \geq u$ . En effet, de façon classique [31], la période de retour de la condition  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%} > x$  (qui, sous l'hypothèse de stationnarité considérée, peut s'interpréter comme le temps moyen

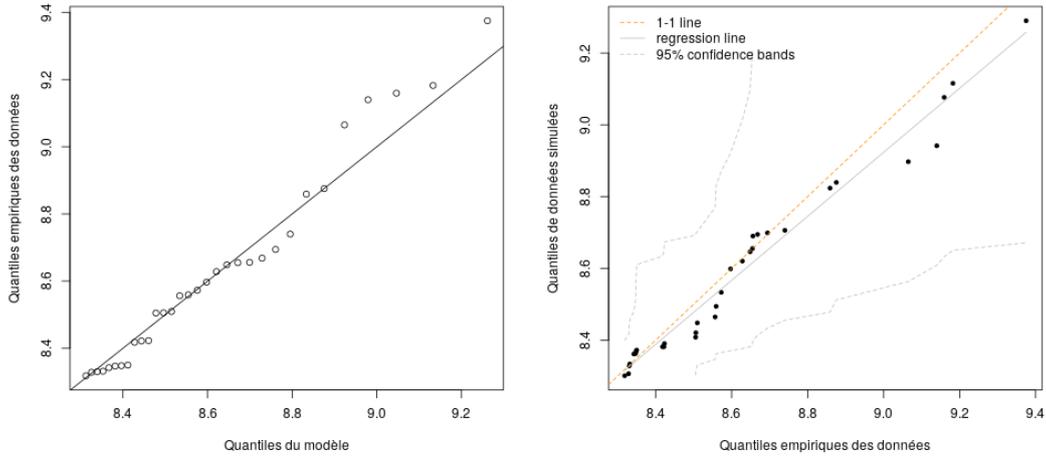


FIGURE 6.14 – Panneau gauche : diagramme quantiles-quantiles comparant les quantiles empiriques de  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$  et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction  $G_{u,\hat{\sigma},\hat{\xi}}^{-1}$ . Panneau droit : diagnostic supplémentaire obtenu à l'aide de simulations comme expliqué dans [21].

entre deux occurrences de cette condition) peut être estimée par

$$\text{PR}(x) = \frac{\mu_u}{\hat{\text{Pr}}(\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%} > x)} = \frac{\mu_u}{1 - G_{u,\hat{\sigma},\hat{\xi}}(x)}, \quad (6.3)$$

où

$$\mu_u = \frac{2015 - 1949}{\sum_{t \in \mathcal{T}} \mathbf{1}\{\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t) > u\}}, \quad (6.4)$$

et  $\mathcal{T}$  est l'ensemble de dates apparaissant dans ALEA. Dans (6.3) et (6.4),  $\mu_u$  est le nombre moyen d'années, calculé à partir d'ALEA (donc sur la période 1949-2015), entre deux occurrences de la condition  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%} > u$ .

La figure 6.15 représente le graphe de la fonction permettant d'estimer la valeur de  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$  correspondant à une période de retour donnée. Les courbes en pointillés noires sont les limites de confiance prenant en compte l'incertitude liée à l'estimation des paramètres de la GPD. Les points correspondent aux événements pour lesquels  $\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t)$  est supérieur au seuil  $u = 8.3 \text{ m}$  et ont pour ordonnées leur valeur  $v$  de  $\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t)$  et pour abscisses les périodes de retour empiriques calculées de façon similaire à  $\mu_u$  dans (6.4) (avec  $u$  remplacé par  $v$ ). Les segments en pointillés rouges mettent en valeur le niveau de  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$  pour les tempêtes de l'hiver 2013-2014 Hercules, Christine et Nadja (de gauche à droite) ainsi que les périodes de retour correspondantes calculées à l'aide de (6.3). Enfin, le tableau 6.4 donne les valeurs  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$  et les périodes de retour associées pour les 15 conditions océaniques de la forme  $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%} > \eta + R_{2\%}$  ayant les plus fortes périodes de retour estimées rencontrées dans ALEA. Comme nous pouvons le constater, ce sont les conditions rencontrées lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014 qui ont globalement les plus fortes périodes de retour exceptée une date en 1965 dont la période de retour apparaît également très élevée. Parmi les conditions les plus extrêmes, le calcul a conduit à l'identification de deux dates non répertoriées lors de la recherche documentaire historique. La

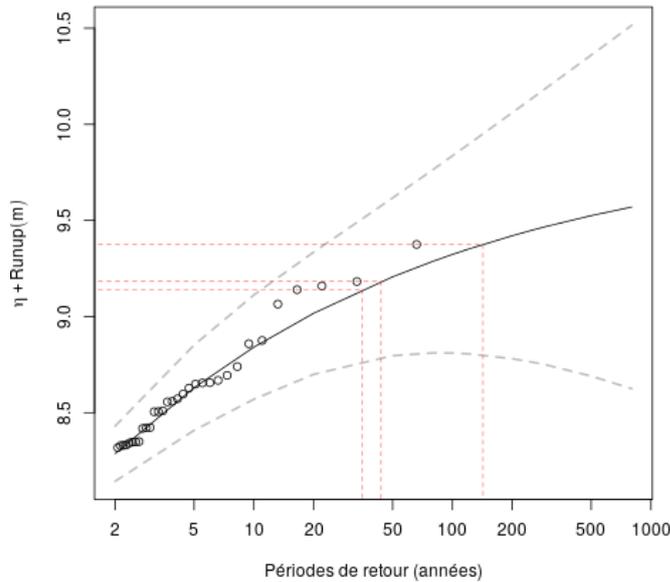


FIGURE 6.15 – Graphe de la fonction permettant d'estimer le niveau de  $\eta + \mathbf{R}_{2\%}$  en fonction de la période de retour. Les courbes en pointillés noirs sont les limites de confiance prenant en compte l'incertitude liée à l'estimation des paramètres de la GPD. Les points correspondent aux évènements pour lesquels  $\eta(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t)$  est supérieur au seuil  $u = 8.3 \text{ m}$  et ont pour ordonnée leur valeur  $\eta(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t)$  et pour abscisse leur période de retour empirique. Les segments en pointillés rouges mettent en valeur le niveau de  $\eta + \mathbf{R}_{2\%}$  pour les tempêtes de l'hiver 2013-2014 Hercules, Christine et Nadja (de gauche à droite) ainsi que les périodes de retour correspondantes calculées à l'aide de (6.3).

première peut probablement être rattachée à la tempête 4. La seconde, en revanche, est clairement distincte et mériterait une recherche documentaire supplémentaire.

## 6.2.2 Périodes de retour calculées à partir de la règle $\mathbf{R6}(t)$

Rappelons que la règle  $\mathbf{R6}(t)$  est donnée par :

**$\mathbf{R6}(t)$**  :  $P(t) > 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $\eta(t) > 4 \text{ m}$ .

De façon similaire à ce qui a été présenté dans la section précédente, l'objectif a été d'estimer les périodes de retour de conditions océaniques pouvant être caractérisées par un dépassement simultané d'un seuil  $u_P$  du flux  $\mathbf{P}$  et d'un seuil  $u_\eta$  du niveau d'eau  $\eta$ . Cette situation, généralisant l'approche univariée présentée dans la section précédente, a nécessité la modélisation de la distribution du vecteur aléatoire  $(\mathbf{P}, \eta)$  dans la région  $[u_P, \infty[ \times [u_\eta, \infty[$ . À l'instar de [31] (voir aussi [45]), une approche possible consiste à modéliser dans un premier temps marginalement les distributions de  $\mathbf{P}$  et  $\eta$  puis à former la distribution du vecteur aléatoire  $(\mathbf{P}, \eta)$  à l'aide d'une *copule*.

Dans la section 6.1.2, nous avons observé que les maxima du flux et du niveau

Tempête	Dommages	Date	$\eta + R_{2\%}$	Période de retour
1	2	1951-12-29	8.65	5.28
4	1	1965-01-18	8.51	3.49
4	1	1965-01-18	8.51	3.53
4	1	1965-01-19	8.35	2.33
		1965-01-21	9.16	38.87
12	1	1990-01-30	8.63	4.96
12	1	1990-01-31	8.74	7.05
14	1	1998-12-30	8.65	5.38
		2008-03-11	8.88	11.33
20	2	2010-11-09	8.42	2.79
Quirin	0	2011-02-16	8.86	10.66
Hercules	2	2014-01-06	9.18	43.78
Hercules	2	2014-01-07	9.06	24.65
Nadja	2	2014-02-02	9.38	142.25
Christine	2	2014-03-04	9.14	35.22

TABLEAU 6.4 – Valeurs  $\eta + R_{2\%}$  et périodes de retour associées (en années) pour les 15 conditions océaniques de la forme  $\eta + R_{2\%} > \eta + R_{2\%}$  rencontrées dans **ALEA** ayant les plus fortes périodes de retour estimées.

d'eau calculés sur les durées des événements répertoriés lors de la recherche historique étaient peu voire pas linéairement corrélés. Les nuages de points de dates dans **ALEA** satisfaisant  $P(t) > u_P$  et  $\eta(t) > u_\eta$  pour  $u_P$  et  $u_\eta$  proches de  $400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $4 \text{ m}$ , respectivement, suggèrent que les variables aléatoires **P** et  **$\eta$**  sont indépendantes dans la région  $[u_P, \infty[ \times [u_\eta, \infty[$ . La figure 6.16 présente le nuage de points obtenus pour  $u_P = 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $u_\eta = 4 \text{ m}$ . Le test d'indépendance entre **P** et  **$\eta$**  fondé sur le tau de Kendall pour ces données donne une p-valeur de 0.5722, suggérant que l'indépendance est plausible [46] (il faut néanmoins noter que les observations de **P** et  **$\eta$**  au-dessus des seuils présentent probablement une faible dépendance sérielle, ce qui conduit vraisemblablement à une faible sur-estimation de la p-valeur du test). Il ne nous a ainsi pas semblé nécessaire de modéliser la dépendance entre **P** et  **$\eta$**  dans des régions de la forme  $[u_P, \infty[ \times [u_\eta, \infty[$ , pour  $u_P$  et  $u_\eta$  proches de  $400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  et  $4 \text{ m}$ , respectivement.

Pour estimer la distribution (**P**,  **$\eta$** ) dans la région  $[u_P, \infty[ \times [u_\eta, \infty[$ , il a ainsi suffi d'estimer marginalement les distributions de **P** et de  **$\eta$** . Pour le flux **P**, nous avons procédé comme dans la section précédente à l'aide d'une GPD. Les graphiques présentés dans la figure 6.17 suggèrent que le choix  $u_P = 400 \text{ J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  n'est pas incohérent. Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont  $\hat{\sigma} = 87.18498$  et  $\hat{\xi} = -0.280265$  et le diagramme quantiles-quantiles correspondant est donné dans la figure 6.18.

Pour estimer la distribution de  **$\eta$** , l'approche précédente est moins pertinente car une valeur de  $u_\eta$  autour de  $4 \text{ m}$  ne correspond pas à un quantile élevé de la distribution de  **$\eta$** . Nous avons alors arbitrairement choisi de prendre  $u_\eta = 4 \text{ m}$  et de modéliser la distribution de  **$\eta$**  sur les intervalles  $[4, 4.6[$ ,  $[4.6, 4.8[$  et  $[4.8, \infty[$  à

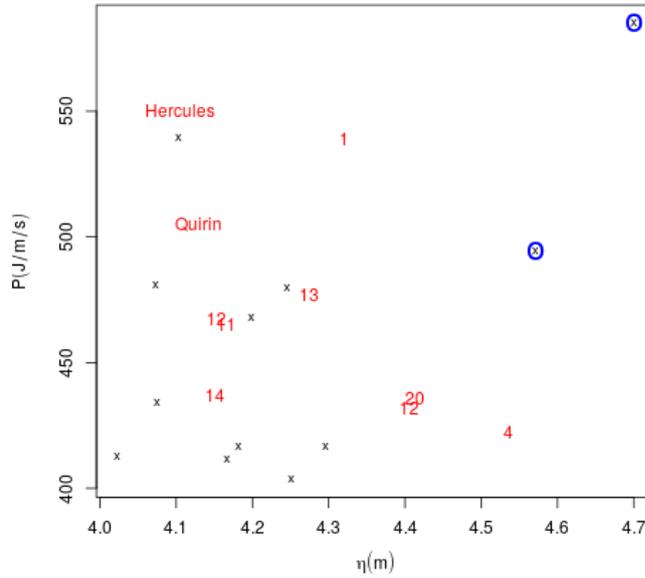


FIGURE 6.16 – Nuage de points des dates dans **ALEA** pour lesquelles  $P(t) > 400 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $\eta(t) > 4 \text{ m}$ . Les dates en rouge appartiennent à des évènements répertoriés lors de la recherche historique. Les deux dates non répertoriées en bleue sont celles identifiées dans le tableau 6.4 et que l'on retrouve également dans le tableau 6.5 ci-après.

l'aide de différentes GPD. Ce choix peut être empiriquement justifié par les diagrammes quantiles-quantiles représentés dans les figures 6.19, 6.20 et 6.21. La figure 6.19 semble indiquer que la GPD obtenue avec  $u_\eta = 4 \text{ m}$ ,  $\hat{\sigma} = 0.3502587$  et  $\hat{\xi} = -0.3340908$  est un bon modèle sur l'intervalle  $[4, 4.6[$ . De même, la figure 6.20 (respectivement, 6.21) semble indiquer que la GPD obtenue avec  $u_\eta = 4.6 \text{ m}$  (respectivement,  $4.8 \text{ m}$ ),  $\hat{\sigma} = 0.1266291$  (respectivement,  $0.06773214$ ) et  $\hat{\xi} = -0.2572247$  (respectivement,  $-0.19672699$ ) est un modèle correct sur l'intervalle  $[4.6, 4.8[$  (respectivement,  $[4.8, \infty[$ ). Pour résumer, la fonction de répartition de  $\eta$  sur  $[4, \infty[$  a été modélisée par :

$$\hat{G}(x) = \begin{cases} G_{4,0.35,-0.33}(x) & \text{si } 4 \leq x < 4.6, \\ G_{4.6,0.13,-0.26}(x) & \text{si } 4.6 \leq x < 4.8, \\ G_{4.8,0.07,-0.2}(x) & \text{si } 4.8 \leq x. \end{cases}$$

La période de retour d'une condition océanique " $\mathbf{P} > P$  et  $\eta > \eta$ " peut alors être estimée par :

$$\text{PR}(\mathbf{P}, \eta) = \frac{\mu}{\hat{P}r(\mathbf{P} > P, \eta > \eta)} = \frac{\mu}{\hat{P}r(\mathbf{P} > P)\hat{P}r(\eta > \eta)} = \frac{\mu}{\{1 - G_{400,87.2,-0.28}(P)\}\{1 - \hat{G}(\eta)\}},$$

où

$$\mu = \frac{2015 - 1949}{\sum_{t \in \mathcal{I}} \mathbf{1}\{P(t) > 400, \eta(t) > 4\}}.$$

Le tableau 6.5 donne les valeurs  $\eta$ ,  $P$  et les périodes de retour associées pour les 14 conditions océaniques de la forme " $\mathbf{P} > P$  et  $\eta > \eta$ " rencontrées dans **ALEA** ayant

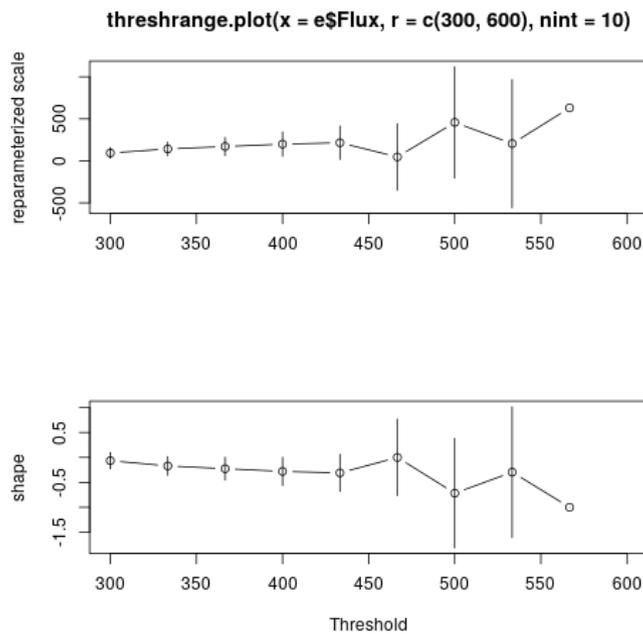


FIGURE 6.17 – Graphiques produits par le package R `extRemes` [21] donnant les estimations des paramètres de forme et d'échelle pour plusieurs valeurs de seuils lors de la modélisation de la distribution de  $\mathbf{P}$  à l'aide d'une GPD. L'heuristique souvent utilisée consiste à considérer un seuil dans le sous-intervalle pour lequel les estimations sont relativement stables.

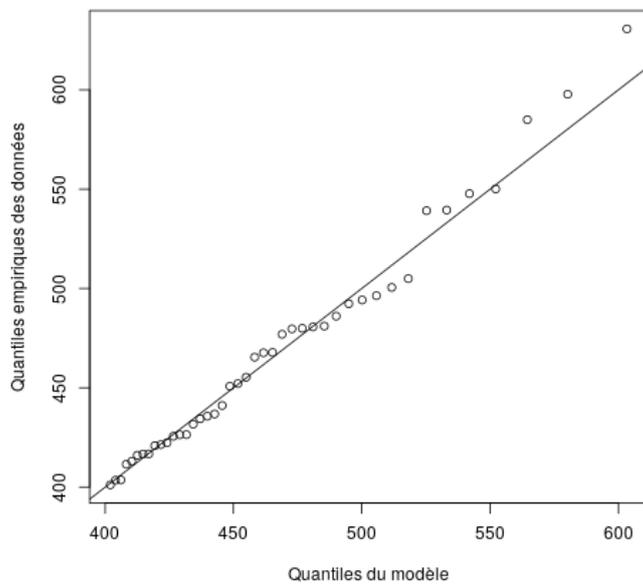


FIGURE 6.18 – Diagramme quantiles-quantiles comparant les quantiles empiriques de  $\mathbf{P}$  et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction  $G_{u, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ .

les plus fortes périodes de retour estimées (en années). Comme dans le cas de l'ana-

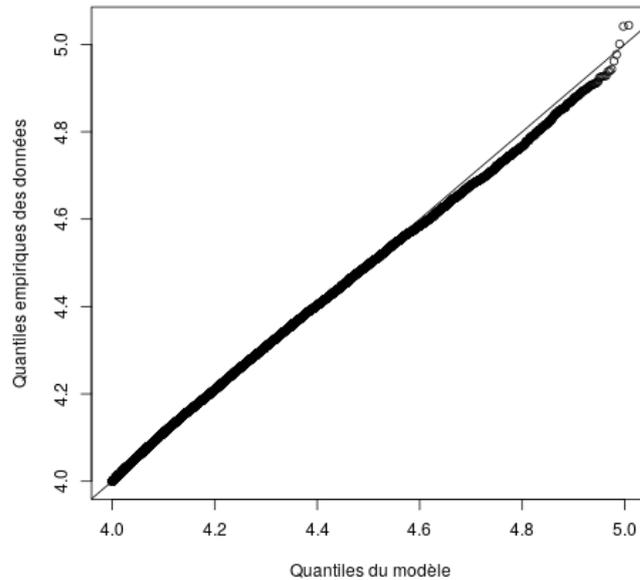


FIGURE 6.19 – Diagramme quantiles-quantiles obtenu pour  $u_\eta = 4$  m comparant les quantiles empiriques de  $\eta$  et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction  $G_{u_\eta, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont  $\hat{\sigma} = 0.3502587$  et  $\hat{\xi} = -0.3340908$ .

lyse univariée résumée par le tableau 6.4, parmi les conditions les plus extrêmes, nous retrouvons les deux mêmes dates non répertoriées lors de la recherche documentaire historique. On observe néanmoins des variations significatives en terme de période de retour pour un même évènement en considérant l'une ou l'autre des règles. La tempête Nadja par exemple qui avait la période de retour la plus forte avec le critère basé sur le niveau d'eau total (i.e. 142 ans) voit sa période de retour divisée par plus de 5 avec le critère basé sur le flux d'énergie des vagues et le niveau d'eau. Globalement, le caractère extrême de l'hiver 2013-2014 est ainsi un peu moins marqué avec le second critère qu'avec le premier. De même, les deux dates qui n'apparaissaient pas dans la recherche de dégâts se voient qualifiées d'évènements extrêmes avec des périodes de retour de plus de 100 ans par la règle flux/niveau d'eau. Clairement, si la première date peut être rapprochée de la tempête historique de 1965, le 11 mars 2008 est une date nouvelle qui doit être recherchée spécifiquement dans les données d'archives. Cependant, cette date est connue et correspond à la tempête appelée "Johanna" qui est plutôt bien décrite et a été étudiée par un important consensus de chercheurs internationaux [62]. Cet évènement est surtout connu pour ses dégâts dans la partie nord de la France [8].

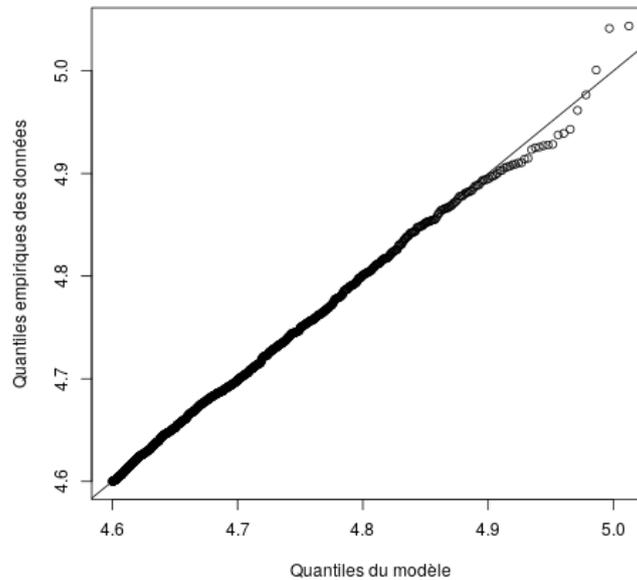


FIGURE 6.20 – Diagramme quantiles-quantiles obtenu pour  $u_\eta = 4.6 m$  comparant les quantiles empiriques de  $\eta$  et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction  $G_{u_\eta, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont  $\hat{\sigma} = 0.1266291$  et  $\hat{\xi} = -0.2572247$ .

Tempête	Dommages	Date	$\eta$	P	Période de retour
1	2	1951-12-29	4.32	539.15	67.95
4	1	1965-01-18	4.53	422.35	30.40
		1965-01-21	4.70	584.99	166.86
11	0	1989-02-26	4.17	465.42	10.72
12	1	1990-01-30	4.15	467.62	10.55
12	1	1990-01-31	4.41	431.67	17.48
13	0	1996-02-08	4.27	476.93	18.79
14	1	1998-12-30	4.15	436.81	6.87
		2008-03-11	4.57	494.20	105.65
20	2	2010-11-09	4.41	435.66	19.05
Quirin	0	2011-02-16	4.13	504.96	17.69
Hercules	2	2014-01-07	4.11	550.12	39.66
Nadja	2	2014-02-02	4.87	480.64	26.04
Christine	2	2014-03-04	4.79	500.52	70.54

TABLEAU 6.5 – Valeurs  $\eta$ , P et périodes de retour associées (en années) pour les 14 conditions océaniques de la forme “P > P et  $\eta > \eta$ ” rencontrées dans ALEA ayant les plus fortes périodes de retour estimées.

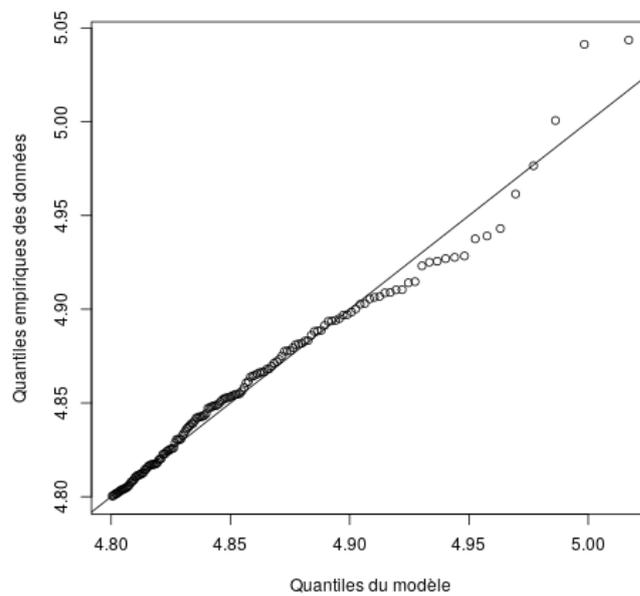


FIGURE 6.21 – Diagramme quantiles-quantiles obtenu pour  $u_\eta = 4.8 \text{ m}$  comparant les quantiles empiriques de  $\eta$  et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction  $G_{u_\eta, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont  $\hat{\sigma} = 0.06773214$  et  $\hat{\xi} = -0.19672699$ .

## Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse a consisté à produire des bases de données décrivant les conditions océaniques et les dégâts sur la côte basque au cours de la période 1949-2015 et à utiliser ces bases pour modéliser la présence ou l'absence de dégâts lors de la submersion. Les chapitres 2, 3 et 4 résument la construction des séries temporelles de variables d'aléa (états de mer et niveaux d'eau) préparées de manière à couvrir la période temporelle 1949-2015 pour les points correspondant aux bouées d'Anglet et de Saint-Jean-de-Luz. Ces données proviennent de la simulation numérique WWMII et ont été corrigées à l'aide de transformations en probabilité et quantile. Dans le chapitre 5, nous avons décrit le travail de recherche historique qui a permis d'identifier les événements de tempêtes ayant affecté la côte basque et plus particulièrement la Grande Plage de Biarritz. Cette investigation a permis la construction d'un catalogue de 30 tempêtes contenant une classification sous forme d'indices de dégâts et de submersion. Enfin, dans le chapitre 6, l'ensemble de ces données a été exploité de manière à proposer des règles pour distinguer les événements ayant produit des dégâts des autres événements. Des seuils pour le niveau d'eau  $\eta$  et pour une variable d'état de mer brute ( $H_s, T_p \dots$ ) ou transformée ( $P$  ou  $R_{2\%}$ ) ont généralement permis de distinguer les événements à dégâts des événements sans dégâts. Ces règles ont enfin été utilisées pour calculer des périodes de retour pour les événements répertoriés. Le niveau d'eau a été considéré comme une seule variable, pour approfondir l'analyse il serait intéressant de faire la distinction entre les différentes composantes : marée, effet barométrique, surcote... de manière à comparer les différentes contributions vis à vis des dégâts observés.

Lors du calcul des périodes de retour, nous n'avons utilisé que les règles "instantanées"  $\mathbf{R}_i(t)$ ,  $i \in \{5, 6\}$  (voir section 6.1.4). Or, lors de la validation des règles ainsi que dans la qualification des dégâts, la notion de durée de tempête intervient, ce qui nous avait également amené à considérer les règles "à retard"  $\mathbf{R}_i(t, \tau)$ ,  $i \in \{1, \dots, 4\}$  (voir section 6.1.4) pour lesquelles un retard de  $\tau = 4$  cycles de marée semblait donner en général les meilleurs résultats. Il nous paraît intéressant de réaliser des calculs de périodes de retour également à partir des règles à retard. Cela pourrait être effectué en ne gardant qu'un cycle de marée sur 4 et en associant aux dates correspondantes les maxima des variables d'aléa sur ces 4 derniers cycles. En d'autres termes, cela nécessiterait un découpage préalable de la série temporelle initiale en blocs de 4 observations. Procéder de la sorte limiterait également la démultiplication des sous-événements relatifs à une même tempête (cf. la tempête 1965 dans le tableau 6.4).

Les résultats pour les évènements de l'hiver 2013-2014 montrent un niveau exceptionnel de dommages par rapport au reste de la période 1949-2015, ce qui se traduit ensuite, avec notre méthodologie, par des périodes de retour qui sont cohérentes avec l'intensité des dégâts observée. Néanmoins, nous pouvons noter que nous n'avons pas considéré les hivers dans leur ensemble. Une idée intéressante serait de proposer une méthode pour caractériser un hiver complet et réussir à distinguer 2013-2014 du reste des données. Cette caractérisation par hiver est également une attente au niveau des gestionnaires du littoral. Des pistes peuvent être données dans ce sens comme par exemple sommer par hiver le flux d'énergie des vagues au dessus d'un seuil de niveau d'eau avec ou sans seuil sur le flux.

Les deux règles utilisées pour calculer des périodes de retour ont conduit à identifier deux dates non répertoriées par la recherche historique. Cela suggère une reprise de la méthodologie de recherche d'informations sur les dégâts liés à la submersion. La première date correspond au 21 janvier 1965, date très proche de la tempête 4. Cela peut amener à reconsidérer les dates retenues pour cet évènement. La seconde date, le 11 mars 2008, est en revanche complètement isolée, cet évènement correspond à la tempête "Johanna" décrite, notamment, dans les documents [8] et [62]. Il est naturel de s'interroger sur l'étude historique des données de dégâts qui n'a rien identifié pour cet évènement alors qu'il a été étudié largement pour d'autres parties du territoire. Cette méthodologie pourrait ensuite être appliquée à l'ensemble des règles retenues pour explorer toute date non répertoriée qui présente un doute sur la présence ou non de dégâts.

La réalisation de ce travail repose sur plusieurs hypothèses qui peuvent être sujettes à débat. Par exemple, un problème potentiel provient du fait que tous les calculs de run-up  $R_{2\%}$  ont été effectués sous une hypothèse de constance de la pente de la Grande Plage de Biarritz. Ce manque de réalisme induit probablement un biais d'analyse pour les résultats présentés. De façon nettement plus importante, la série temporelle des variables d'aléa a été exploitée (et corrigée) sous une hypothèse de stationnarité. Or, il est naturel d'imaginer que, dans un contexte de changement climatique, cette série couvrant la période 1949-2015 ne puisse pas être considérée comme stationnaire (notons néanmoins que, dans la section 3.2, la non-stationnarité de la série temporelle de niveaux d'eau a été prise en compte). Cela influe directement sur l'interprétation des périodes de retour calculées dont le sens même peut être remis en cause.

Enfin, il est évident que l'étude décrite dans ce manuscrit est aussi très limitée spatialement. Il apparaît ainsi nécessaire de poursuivre la méthodologie pour inclure a minima d'autres sites de la côte basque française et/ou espagnole. Les données d'aléa correspondantes sont souvent disponibles. Il reste néanmoins à collecter les données de dégâts associées, ce qui nécessite un effort et un temps considérables pour des résultats qui restent subjectifs. Un tel effort est néanmoins poursuivi au sein du GIS littoral basque dans le cadre du projet Feder Ezponda, ce qui devrait ainsi permettre d'étendre la portée de la méthodologie utilisée dans ce travail.

# Liste des figures

1.1	Carte de situation du Pays basque français. . . . .	4
1.2	Occupation des sols au niveau du sud-ouest français [44]. . . . .	4
1.3	Logo du projet européen MAREA. . . . .	7
1.4	Différentes institutions partenaires du projet Européen MAREA. . . . .	8
2.1	Schéma issu de [43] décrivant les différents régimes de submersion : à gauche franchissement par vague, au milieu débordement par augmentation du niveau d'eau et à droite addition des deux phénomènes. . . . .	10
2.2	Exemple de mesure de pression convertie en hauteur d'eau, par 20 mètres de fond environ dans l'anse de Berthaume, le 31 janvier 2004. Données d'un capteur de pression sur un temps court (1000 secondes). Les oscillations représentent le changement de l'élévation de la surface de l'eau. La tendance rouge représente le changement de fond lié à la marée. La figure provient du cours sur les états de mer de Fabrice Arduin et Philippe Bonneton. . . . .	11
2.3	Exemple de déplacement mesuré par une bouée houlographe, qui suit le mouvement de la surface, au large de Crozon en mai 2004. Les deux points rouges délimitent une vague. L'information liée à chaque vague peut ainsi être extraite et il est possible de calculer des indicateurs statistiques pour un temps de mesure donné. La figure provient du cours sur les états de mer de Fabrice Arduin et Philippe Bonneton. . . . .	12
2.4	Schéma de classification des vagues en fonction de leur période issue de [35]. . . . .	13
2.5	Schéma de représentation des différentes composantes du niveau d'eau au bord d'une plage. $\eta$ est le niveau d'eau mesurable, $Z_0$ est le niveau moyen en un lieu donné, $M$ est la composante de marée astronomique, $S$ est la surcote océanique, $R$ est le run-up défini dans la section 2.4.3.ii et $TWL$ est le niveau d'eau total. . . . .	14
2.6	Spectre de la densité d'énergie ( $E$ ) en fonction de la fréquence ( $f$ ) correspondant à la figure 2.2. La figure provient du cours sur les états de mer de Fabrice Arduin et Philippe Bonneton. . . . .	16

2.7	Schéma d'obtention des données d'état de mer. Le graphe 1 représente un signal d'élévation de l'eau. Le graphe 2' est un spectre issu d'un état de mer $t_i$ . Le tableau 2 résume l'information de chaque vague d'un état de mer $t_i$ . Le tableau 3 donne les caractéristiques de chaque état de mer issu de l'élévation 1. Les graphiques sont réalisés avec des données factices. . . . .	16
3.1	Situations des bouées de mesures et des marégraphes pour le Pays basque français. Image réalisée grâce à Google Earth. . . . .	25
3.2	Domaine couvert par le maillage du modèle HOMERE. . . . .	27
3.3	Maillage utilisé pour la simulation WWMII. La figure de gauche montre la zone de l'Océan Atlantique concernée et la figure de droite montre le zoom sur le domaine correspondant au Golfe de Gascogne. L'échelle de couleur décrit la taille des mailles utilisées dans chaque secteur du domaine [66]. . . . .	28
3.4	Moyennes annuelles (à gauche) et mensuelles (à droite) du niveau d'eau en fonction du temps pour le marégraphe de Socoa. Les droites rouges sont les régressions linéaires des niveaux d'eau en fonction du temps. . . . .	31
3.5	Surcote (en m) en fonction de la pression (en $P_a$ ) pour le point du marégraphe de Socoa. La tendance rouge est la régression linéaire simple entre les deux variables. . . . .	32
4.1	Diagramme quantiles-quantiles pour $H_s$ (en $m$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). . . . .	41
4.2	Diagramme quantiles-quantiles pour $T_{m10}$ (en $s$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). . . . .	42
4.3	Diagramme quantiles-quantiles pour $P$ (en $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). La figure du bas donne les densités estimées entre 300 et 400 $J.m^{-1}.s^{-1}$ . . . . .	43
4.4	Diagramme quantiles-quantiles pour $R_{2\%}$ (en $m$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée d'Anglet (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). . . . .	43
4.5	Diagramme quantiles-quantiles pour $H_s$ (en $m$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). . . . .	45
4.6	Diagramme quantiles-quantiles pour $T_{m10}$ (en $s$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). . . . .	46

4.7	Diagramme quantiles-quantiles pour le flux P (en $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) obtenu en comparant les données d'observation et les données de simulation au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz (à gauche) et densités estimées des valeurs observées et des valeurs issues des deux simulations (à droite). . . . .	46
4.8	Diagrammes quantiles-quantiles (à gauche) et fonctions de densités estimées (à droite) pour $\eta$ (en $m$ ) pour les données au point du marégraphe de Socoa. . . . .	47
4.9	Diagrammes quantiles-quantiles (à gauche) et fonctions de densités (à droite) pour le flux P (en $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) pour la série temporelle de la bouée, de la simulation WWMII et les quatre corrections testées au point de la bouée d'Anglet. . . . .	48
4.10	Valeurs de $H_s$ en $m$ pour la bouée (en rouge), <b>WWMII.ANG</b> avant (en bleu) et après (en vert) correction au niveau du point de la bouée d'Anglet entre le 12 et le 14 février 2011. . . . .	50
4.11	Diagrammes quantiles-quantiles (à gauche) et fonctions de densités (à droite) pour le flux P (en $J.m^{-1}.s^{-1}$ ) pour la série temporelle de la bouée, de la simulation WWMII et les quatre corrections testées au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz. . . . .	50
5.1	Photographie de la ville de Biarritz [44]. . . . .	57
5.2	Photographie de la zone 1 : le plateau de l'Atalaye à Biarritz. . . . .	58
5.3	Photographie de la zone 2 : le Port Vieux à Biarritz. . . . .	58
5.4	Photographie de la zone 3 : la Grande Plage à Biarritz. . . . .	58
5.5	Photographie de la zone 4 : la plage Miramar à Biarritz. . . . .	59
5.6	Photographie de la zone 5 : le cap Saint Martin à Biarritz. . . . .	59
5.7	Tableau résumant les zones impactées pour chaque évènement répertorié lors de la première partie de la recherche historique. La présence du symbole "o" indique la présence d'informations de dégâts dans la zone considérée. La date correspond à une date de début d'évènement. L'indice d'intensité des dégâts a été subjectivement associé à un évènement via les dossiers sources le concernant. . . . .	60
5.8	Photographie de la baie de Saint-Jean-de-Luz. . . . .	62
5.9	Bloc de béton utilisé pour renforcer la digue de l'Artha en vue de l'hiver suivant. . . . .	62
5.10	Présentation générique d'une fiche tempête pour le catalogue réalisé. . . . .	64
6.1	Schéma résumant les différentes étapes effectuées dans ce travail dans le but de caractériser les tempêtes à dommages : . . . . .	68
6.2	Cercle des corrélations obtenu après analyse en composantes principales des maxima des variables d'aléa des tempêtes répertoriées entre 1949 et 2015 pour la Grande Plage de Biarritz. Le maximum de P (respectivement, $\eta$ ) est noté FluxMax (respectivement, LevelMax). La notation est sans ambiguïté pour $H_s$ , $T_p$ , $T_{m10}$ et $R_{2\%}$ . . . . .	73

6.3 Projections des tempêtes répertoriées entre 1949 et 2015 pour la Grande Plage de Biarritz sur le plan engendré par les deux premières composantes principales après analyse en composantes principales des maxima des variables d'aléa. Les couleurs correspondent à l'indice de dégâts attribué par la recherche historique. . . . . 74

6.4 Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) de  $H_s$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 75

6.5 Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) de  $T_p$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 76

6.6 Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) du flux P. Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 76

6.7 Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur (maximale dans le panneau de gauche, moyenne dans le panneau de droite) de  $R_{2\%}$ . Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 77

6.8 Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau total  $\eta + R_{2\%}$ , appelé *Total Water Level* (TWL) en anglais (maximum dans le panneau de gauche, moyen dans le panneau de droite) et de la valeur de la moyenne de  $\theta_m$  (dans les deux panneaux). Les maxima et moyennes sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 77

6.9 Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  et de la valeur du flux  $P$ . Le panneau de gauche représente les tempêtes décrites par leurs valeurs de  $P$  (en ordonnée) quand  $\eta$  est maximum (en abscisse). Le panneau de droite représente les tempêtes décrites par leurs valeurs de  $\eta$  (en abscisse) quand  $P$  est maximum (en ordonnée). Les maxima sont calculés sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 79

6.10 Le panneau gauche représente les tempêtes en fonction du maximum de  $I$  (en abscisse) et de la moyenne de la direction  $\theta_m$  (en ordonnée) calculés sur la durée de chaque évènement. Le panneau droit représente les tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  au maximum de  $I$  (en abscisse) et du flux  $P$  au maximum de  $I$  (en ordonnée). Les  $\square$  (respectivement, les  $+$ ,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . . 80

6.11 Arbre de décision estimé à partir de la jointure des tableaux **STORMS** permettant de prédire la présence (codée par un 1 – dommages d'intensité 1 ou 2) ou l'absence (codée par un 0 – dommages d'intensité 0) de dégâts. Les maxima et moyennes des variables d'aléa sont calculés sur les durées des 30 tempêtes répertoriées durant la recherche historique entre 1949 et 2015. . . . . 81

6.12 Arbre de décision obtenu pour les maxima et moyennes des variables d'aléa calculés sur les durées des 30 tempêtes relevées par la recherche historique entre 1949 et 2015. . . . . 82

6.13 Graphiques produits par le package R `extRemes` [21] donnant les estimations des paramètres de forme et d'échelle pour plusieurs valeurs de seuils lors de la modélisation de la distribution de  $\eta + \mathbf{R}_{2\%}$  à l'aide d'une GPD. L'heuristique souvent utilisée consiste à considérer un seuil dans le sous-intervalle pour lequel les estimations sont relativement stables. . . . . 86

6.14 Panneau gauche : diagramme quantiles-quantiles comparant les quantiles empiriques de  $\eta + \mathbf{R}_{2\%}$  et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction  $G_{u,\hat{\sigma},\hat{\xi}}^{-1}$ . Panneau droit : diagnostic supplémentaire obtenu à l'aide de simulations comme expliqué dans [21]. . . . . 87

6.15	Graphe de la fonction permettant d'estimer le niveau de $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$ en fonction de la période de retour. Les courbes en pointillés noires sont les limites de confiance prenant en compte l'incertitude liée à l'estimation des paramètres de la GPD. Les points correspondent aux événements pour lesquels $\eta(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t)$ est supérieur au seuil $u = 8.3 m$ et ont pour ordonnée leur valeur $\eta(t) + \mathbf{R}_{2\%}(t)$ et pour abscisse leur période de retour empirique. Les segments en pointillés rouges mettent en valeur le niveau de $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%}$ pour les tempêtes de l'hiver 2013-2014 Hercules, Christine et Nadja (de gauche à droite) ainsi que les périodes de retour correspondantes calculées à l'aide de (6.3). . . . .	88
6.16	Nuage de points des dates dans <b>ALEA</b> pour lesquelles $P(t) > 400 J.m^{-1}.s^{-1}$ et $\eta(t) > 4 m$ . Les dates en rouge appartiennent à des événements répertoriés lors de la recherche historique. Les deux dates non répertoriées en bleue sont celles identifiées dans le tableau 6.4 et que l'on retrouve également dans le tableau 6.5 ci-après. . . . .	90
6.17	Graphiques produits par le package R <code>extRemes</code> [21] donnant les estimations des paramètres de forme et d'échelle pour plusieurs valeurs de seuils lors de la modélisation de la distribution de <b>P</b> à l'aide d'une GPD. L'heuristique souvent utilisée consiste à considérer un seuil dans le sous-intervalle pour lequel les estimations sont relativement stables. . . . .	91
6.18	Diagramme quantiles-quantiles comparant les quantiles empiriques de <b>P</b> et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction $G_{u, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . . . . .	91
6.19	Diagramme quantiles-quantiles obtenu pour $u_{\eta} = 4 m$ comparant les quantiles empiriques de $\boldsymbol{\eta}$ et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction $G_{u_{\eta}, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont $\hat{\sigma} = 0.3502587$ et $\hat{\xi} = -0.3340908$ . . . . .	92
6.20	Diagramme quantiles-quantiles obtenu pour $u_{\eta} = 4.6 m$ comparant les quantiles empiriques de $\boldsymbol{\eta}$ et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction $G_{u_{\eta}, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont $\hat{\sigma} = 0.1266291$ et $\hat{\xi} = -0.2572247$ . . . . .	93
6.21	Diagramme quantiles-quantiles obtenu pour $u_{\eta} = 4.8 m$ comparant les quantiles empiriques de $\boldsymbol{\eta}$ et les quantiles théoriques obtenus à l'aide de la fonction $G_{u_{\eta}, \hat{\sigma}, \hat{\xi}}^{-1}$ . Les estimations des paramètres de forme et d'échelle correspondantes sont $\hat{\sigma} = 0.06773214$ et $\hat{\xi} = -0.19672699$ . . . . .	94
A1	Diagramme résumant la méthode pour produire les jeux de données d'aléa. . . . .	128
A2	Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau $\eta$ cumulé et de la valeur cumulée du flux $P$ . Les sommes cumulées sont calculées sur la durée de chaque événement. Les $\square$ (respectivement, les $+$ , $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible. . . . .	129

# Liste des tableaux

3.1	Les bouées du réseau Candhis utilisées dans le cadre de cette étude. Seule la bouée de Bayonne a cessé de fonctionner. Les dates correspondent à la fenêtre de temps utilisé dans ce document pour ces bouées.	25
3.2	Tableau résumant les caractéristiques temporelles des deux simulations utilisées.	28
3.3	Caractéristiques des marégraphes et des mesures associées disponibles pour l'étude. Le pourcentage de données manquantes est également indiqué.	30
3.4	Exemple de tableau final pour un jeu de données (mesuré ou simulé) correspondant à un point (une bouée par exemple).	33
4.1	Résumés statistiques des séries temporelles d'états de mer disponibles au point de la bouée d'Anglet.	40
4.2	Biais de simulation absolu et en pourcentage, racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour les simulations WWMII et Homere au point de la bouée d'Anglet pour les variables $H_s$ , $T_{m10}$ et $P$ .	40
4.3	Résumés statistiques des séries temporelles d'états de mer disponibles au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz.	45
4.4	Biais de simulation absolu et en pourcentage, racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour les simulations WWMII et Homere au point de la bouée de Saint-Jean-de-Luz pour les variables $H_s$ , $T_{m10}$ , $T_p$ et $P$ .	45
4.5	Biais de simulation absolu et en pourcentage, racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour les simulations WWMII et Homere au point du marégraphe de Socoa pour la variable $\eta$ (en $m$ ).	47
5.1	Base de données des dégâts liés à la submersion à Biarritz. Quand les évènements correspondent à des tempêtes connues, leur nom est utilisé sinon leur numéro. Les indices de confiance sont codés en 1 (confiance) ou 0 (pas confiance). Les dégâts sont codés en intensité 0 (faibles/absents), 1 (modérés) ou 2 (importants). Et la submersion est codé par 1 (présence) et 0 (absence).	66

6.1	Maxima de chaque variable d'aléa pour chaque évènement répertorié lors de la recherche historique décrite dans le chapitre 5. Lorsque le nom de la tempête est connue, il est utilisé comme identifiant de l'évènement. . . . .	71
6.2	Moyennes de chaque variable d'aléa pour chaque évènement répertorié lors de la recherche historique décrite dans le chapitre 5. Lorsque le nom de la tempête est connue, il est utilisé comme identifiant de l'évènement. . . . .	72
6.3	Résultats de la validation des règles pour $\tau = 4$ sur la série temporelle <b>ALEA</b> . Pour chaque règle, le nombre d'évènements identifiés de catégorie 0, 1 ou 2 est donné ainsi que le nombre d'évènements non répertoriés durant la recherche documentaire historique. Rappelons que, lors de cette dernière, parmi les 30 évènements répertoriés, 21 (respectivement, 4, 5) étaient de catégorie 0 (respectivement, 1, 2). Le nombre de faux positifs s'obtient en additionnant les effectifs de la colonne "0" et de la colonne "Non répertoriés". . . . .	85
6.4	Valeurs $\eta + R_{2\%}$ et périodes de retour associées (en années) pour les 15 conditions océaniques de la forme $\boldsymbol{\eta} + \mathbf{R}_{2\%} > \eta + R_{2\%}$ rencontrées dans <b>ALEA</b> ayant les plus fortes périodes de retour estimées. . . . .	89
6.5	Valeurs $\eta$ , $P$ et périodes de retour associées (en années) pour les 14 conditions océaniques de la forme " $\mathbf{P} > P$ et $\boldsymbol{\eta} > \eta$ " rencontrées dans <b>ALEA</b> ayant les plus fortes périodes de retour estimées. . . . .	93

# Annexes

Pour terminer ce document, voici une série d'annexes décrivant plus en détails la recherche documentaire historique, contenant les trois articles déjà publiés suite à ce travail et résumant enfin le travail de programmation.

## Bases de données

Au cours du chapitre 5, plusieurs bases de données ont été réalisées après un important travail de recherche historique. Les trois documents suivants présentent trois tableaux :

- Le tableau aux pages 105 à 108 correspond au travail d'investigation concernant la digue de l'Artha qui a été présenté au cours de la section 5.3.1 ;
- La base de données des dégâts sur la côte Basque (pages 108 à 110) résume les fiches tempêtes (voir figure 5.10) réalisées au cours de la recherche documentaire. Le tableau est présenté au cours de la section 5.3.2 ;
- Le second tableau (pages 110 à 112) correspond au recueil des détails par événement au niveau de la ville de Biarritz. Il s'agit d'une version plus spécifique du tableau précédent.

Année	Immersion de blocs			Construction de blocs Digue de l'Artha + Jetée de Socoa	Valeurs monétaires						Remarque	Total	Actualisation en € 2016
	Digue de l'Artha	Jetée de Socoa	Somme		Maçonnerie		Blocs : immersion + construction		Somme				
					Digue de l'Artha	Jetée de Socoa	Digue de l'Artha	Jetée de Socoa					
1943	/	/	100	100	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	3 695 000,00 F	338 979,85 €
1944	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1945	/	/	80	80	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	4 000 000,00 F	502 834,56 €
1946	/	/	?	/	537 500,00 F	507 500,00 F	###	8 890 000,00 F	4 888 000,00 F	###	Construction + mouillage (20m3)	###	1 220 980,17 €
1947	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1948	90	45	135	/	1 128 600,00 F	4 918 400,00 F	###	720 000,00 F	360 000,00 F	###	Mouillage	7 127 000,00 F	247 946,39 €
1949	/	/	100	100	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (blocs 25T)	###	488 739,55 €
1950	/	/	100	100	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (10m3)	###	570 021,11 €
1951 (tempête)	0	0	100	100	/	/	###	/	/	###	??	###	600 970,48 €
1952	40	0	40	/	720 000,00 F	16 500 000,00 F	###	13 000 000,00 F	0,00 F	###	Construction + mouilles (blocs 45T)	###	649 082,61 €
1953	100	50	150	150	/	/	###	/	/	###	??	###	611 828,93 €
1954	0	0	97	/	/	/	###	/	/	###	Mouillage	7 089 842,00 F	154 251,66 €
1955	/	/	50	100	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	###	560 350,12 €
1956	/	/	100	100	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	/	###	Construction + mouillage	###	315 243,39 €
1957	99	0	99	90	0,00 F	0,00 F	0,00 F	6 489 000,00 F	0,00 F	###	Construction + mouillage (20m3)	6 489 000,00 F	130 272,54 €
1958 (tempête)	/	/	91	85	/	/	/	1 201 750,00 F	/	###	Construction + mouillage (20m3)	8 420 000,00 F	146 919,91 €
1959	0	0	0	50	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	/	###	Construction (20m3)	3 225 000,00 F	53 006,71 €
1960	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1961	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1962	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1963	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1964	0	0	0	0	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	0,00 F	0,00 €
1965 (tempête)	120	110	230	400	63 800,00 F	113 300,00 F	###	560 000,00 F	560 000,00 F	###	Construction + mouillage (20m3)	1 297 100,00 F	1 710 362,07 €
1966	/	/	65	65	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	301 265,00 F	386 825,81 €
1967	65	0	65	65	178 500,00 F	206 325,00 F	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	444 600,00 F	555 721,53 €
1968	50	0	50	50	/	/	###	25 750,00 F	/	###	Construction + mouillage (20m3)	130 150,00 F	155 655,95 €
1969	50	0	50	67	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	151 494,00 F	170 199,01 €
1970	0	0	0	67	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	/	###	Construction (20m3)	62 862,36 F	67 123,60 €
1971 (tempête)	0	0	0	50	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	/	###	Construction (20m3)	47 510,00 F	48 005,52 €
1972	/	/	54	54	49 844,00 F	0,00 F	###	/	/	###	Construction + mouillage	312 999,80 F	297 928,95 €
1973	/	/	/	/	/	/	###	/	/	###	Immersion	150 000,00 F	130 731,73 €
1974	0	0	0	65	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	/	###	Construction (20m3)	124 795,18 F	95 635,72 €
1975	/	/	/	54	112 500,00 F	13 650,00 F	###	/	/	###	Construction (20m3)	188 250,00 F	129 076,25 €
1976	0	0	30	30	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	123 750,00 F	77 406,94 €
1977	0	0	0	30	44 500,00 F	19 000,00 F	###	/	/	###	Construction (20m3)	99 500,00 F	56 907,18 €
1978	0	0	0	65	26 530,85 F	25 000,50 F	###	/	/	###	Construction (20m3)	106 118,35 F	55 647,81 €
1979	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/	/	/	203 590,83 €
1980	/	/	20	25	92 000,00 F	17 250,00 F	###	/	/	###	Construction + mouillage (20m3)	214 250,00 F	89 333,04 €
1981	10	20	30	30	0,00 F	125 000,00 F	###	150 000,00 F	300 000,00 F	###	Construction + mouillage (20m3)	575 000,00 F	211 405,06 €
1982	10	15	25	25	/	/	###	175 000,00 F	262 500,00 F	###	Construction + mouillage (20m3)	449 000,00 F	147 636,38 €
1983	10	0	10	20	/	/	###	/	/	###	Construction + mouillage (30m3)	300 000,00 F	89 985,87 €
1984	0	0	0	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
1985	17	20	37	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1986 (tempête)	30	12	42	/	/	/	/	/	/	/	/	800 000,00 F	205 639,99 €
1987	0	11	11	60	0,00 F	0,00 F	0,00 F	/	/	###	Construction (20m3)	214 547,40 F	53 467,29 €
1988	13	12	25	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1989	7	13	20	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1990	15	10	25	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1991	15	13	28	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1992	7	12	19	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1993	10	21	31	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1994	15	11	26	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1995	15	14	29	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1996	28	11	39	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1997	18	14	32	?	?	?	?	/	/	/	/	/	/
1998	12	16	28	/	/	/	/	/	/	###	610 121,00 F	119 155,71 €	
1999	18	0	18	/	/	/	/	/	/	'44 344,00 F	744 344,00 F	144 629,47 €	
2000	18	11	29	/	/	/	/	/	/	'20 000,00 F	820 000,00 F	156 737,43 €	
2001	0	24	24	/	/	/	/	/	/	###	620 000,00 F	116 611,48 €	
2002	0	27	27	/	/	/	/	/	/	###	176 899,00 €	214 030,70 €	
2003	9	16	25	/	/	/	/	/	/	###	139 002,00 €	164 795,51 €	
2004	0	24	24	/	/	/	/	/	/	###	126 436,00 €	146 771,25 €	
2005	7	21	28	/	/	/	/	/	/	###	131 681,00 €	150 077,39 €	
2006	7	23	30	/	/	/	/	/	/	###	140 864,00 €	157 973,31 €	
2007	10	20	30	/	/	/	/	/	/	###	173 188,00 €	191 374,08 €	
2008	46	0	46	/	/	/	/	/	/	###	176 852,00 €	190 076,53 €	
2009	11	18	29	/	/	/	/	/	/	###	134 726,00 €	144 676,29 €	

Fuella1

2010	17	15	32		/	/	/	/	/	###		146 000,00 €	154 432,27 €
2011	35	2	37		/	/	/	/	/	###		152 780,00 €	158 261,82 €
2012	22	6	28		/	/	/	/	/	###		148 514,00 €	150 893,84 €
2013	26	4	30		/	/	/	/	/	###		147 627,00 €	148 695,69 €
2014	37	3	40		/	/	/	/	/	###		178 665,00 €	179 058,22 €
2015	30	0	30		/	/	/	/	/	###		198 625,00 €	198 982,52 €
2016	39	6	45		/	/	/	/	/	###		225 900,00 €	225 900,00 €

Tempête	Date de début	Date de fin	Communes touchées par la tempête	Submersion	Communes touchées par la submersion	Nature aléa (Presse-archives)	Endommagement (Presse-archives)	Préjudices (Presse-archives)
Tempête 1	02/10/51	SD	Biarritz	0		/	0	0
Tempête 2	28/12/51	29/12/51	Biarritz, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	1	Biarritz et Saint-Jean-de-Luz	/	1	0
Tempête 3	14/12/58	14/12/58	Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	0		/	0	0
Tempête 4	27/12/60	29/12/60	Biarritz et Saint-Jean-de-Luz	0		/	0	0
Tempête 5	02/01/61	SD	Guéthary	0		/	0	0
Tempête 6	12/11/61	13/11/61	Biarritz et Saint-Jean-de-Luz	0		/	0	0
Tempête 7	17/01/65	20/01/65	Biarritz, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	1	Biarritz et Ciboure	- Hauteur d'eau : 3m80 coeff - Vitesse vent : 180 km/h à Socoa et 85 km/h à Biarritz	1	0
Tempête 8	10/12/65	10/12/65	La Côte Basque	0		- Vitesse vent : 110 km/h à Socoa	0	0
Tempête 9	02/11/67	SD	Biarritz, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	1	Ciboure	- Hauteur d'eau : 112 de coeff - Creux de 10 m	1	0
Tempête 10	14/12/68	SD	Biarritz	1	Biarritz	/	0	0
Tempête 11	20/01/72	21/01/72	Anglet	1	Anglet	- Direction du vent : 0 - Vitesse vent : force 5 (29 à 38 km/h)	1	0
Tempête 12	12/02/72	SD	La Côte Basque	0		- Vitesse vent : 95 km/h		
Tempête 13	06/02/74	07/02/74	Anglet, Saint-Jean-de-Luz et Hendaye	1	Anglet	/	1	0
Tempête 14	24/01/84	24/01/84	La côte Basque	0		/	0	0
Tempête 15	30/01/88	31/01/88	Biarritz et Ciboure	0		- Direction du vent : 0 - Vitesse vent : 119 km/h à Socoa et 88 km/h à Biarritz	0	0
Tempête 16	25/02/89	26/02/89	BAB et Saint-Jean-de-Luz	0		- Hauteur de vagues : + 10m - Vitesse vent : +150 km/h	0	0
Tempête 17	30/01/90	31/01/90	Biarritz, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	1	Biarritz et Saint-Jean-de-Luz	- hauteur d'eau : 91 de coeff - Creux de 5 à 6m - Direction vent : S - SE - Vitesse vent : force 5 à 7 (de 30 à 60 km/h)	1	1
Tempête 18 (tempête historique)	07/02/96	08/02/96	Ensemble des communes littorales basque	0		- Vitesse vent : 65 km/h	0	0
Tempête 19	30/12/98	SD	Biarritz	1	Biarritz	/	1	1
Martin (tempête historique)	27/12/99	30/12/99	Anglet, Biarritz, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Hendaye	0		- Vitesse vent : 122 km/h	0	0
Tempête 20	06/11/00	09/11/00	Anglet et Biarritz	0		- Vitesse vent : 100 km/h	0	0
Tempête 21	07/12/00	08/12/00	Biarritz, Saint-Jean-de-Luz, Ciboure et Hendaye	0		- Vitesse vent : 120 km/h à Socoa et 90 km/h à Biarritz	0	0

## Tempêtes

<b>Tempête 22</b>	14/08/08	15/08/08	Biarritz et Guéthary	1	Biarritz et Guéthary	/	1	0
<b>Klaus (Tempête historique)</b>	23/01/09	24/01/09	Biarritz, Bidart et Guéthary	0		- Vitesse vent : 135 km/h à Biarritz	0	0
<b>Tempête 23</b>	09/11/10	10/11/10	Biarritz, Bidart, Guéthary et Hendaye	1	Biarritz et Hendaye	- Hauteur de vagues : 12m à Anglet - Vitesse vent : 80 km/h à Biarritz et Socoa	1	0
<b>Quirin</b>	15/02/11	16/02/11	Anglet, Biarritz et Saint-Jean-de-Luz	0		- Hauteur de vagues : 6 à 8m	0	0
<b>Tempête 24</b>	20/02/11	SD	Biarritz	1	Biarritz	/	0	0
<b>Tempête 25</b>	15/12/11	SD	La Côte Basque	0		- Hauteur de vagues : 7m	0	0
<b>Tempête 26</b>	28/01/13	SD	Biarritz	0		/	0	0
<b>Tempête 27</b>	11/02/13	SD	Biarritz	0		- Vitesse vent : 100 km/h	0	0
<b>Dirk (Tempête historique)</b>	23/12/13	25/12/13	Anglet, Biarritz et Ciboure	0		- Vitesse vent : 80 à 100 km/h	0	0
<b>Hercules</b>	04/01/14	07/01/14	Anglet, Biarritz, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	1	Anglet, Biarritz et Guéthary	- Hauteur de vagues : 12,5 m à Saint-Jean-de-Luz et 11,8 à Anglet - Vitesse vent : 96 km/h à Biarritz et 117 km/h à Socoa	1	1
<b>Nadja</b>	01/02/14	02/02/14	Anglet, Biarritz, Saint-Jean-de-Luz et Ciboure	1	Biarritz, Saint-Jean-de-Luz et Hendaye	- Houle de 6 à 8m	1	0
<b>Andrea</b>	28/02/14	SD	Biarritz	0		/	0	0
<b>Christine</b>	03/03/14	05/03/14	Anglet, Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Hendaye	1	Anglet, Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz et Hendaye	- Hauteur de vagues : 10m	1	0
<b>Tempête 28</b>	24/02/15	24/02/15	Biarritz	0		- Hauteur de vagues : 8 à 9m	0	0

Éléments de classification	Définition de la tempête d'après la presse et les archives				Nature des + Mettre en plac		
	Date de début	Date de fin	Submersion	Nature aléa (Presse-archives)	Voirie et trottoirs Promenoirs, balustrades, escaliers, bancs, etc.	Bâtiments privés recevant du public Casino	Bâtiments publics Piscine municipale, locaux MNS, etc.
Tempête 1	02/10/51	SD	0	/	0	0	0
Tempête 2	28/12/51	29/12/51	1	/	2	1	1
Tempête 3	14/12/58	14/12/58	0	/	0	0	0
Tempête 4	27/12/60	29/12/60	0	/	0	0	0
Tempête 5	12/11/61	13/11/61	0	/	0	0	0
Tempête 6	18/01/65	19/01/65	1	- Hauteur d'eau : 3m80 coeff - Vitesse vent : 85 km/h à Biarritz	1	0	0
Tempête 7	02/11/67	SD	1	- Hauteur d'eau : 112 de coeff - Creux de 10 m	1	0	0
Tempête 8	14/12/68	SD	1	/	1	0	0
Tempête 10	24/01/84	24/01/84	0	/	0	0	0
Tempête 11	30/01/88	31/01/88	0	- Direction du vent : 0 - Vitesse vent : 88 km/h à Biarritz	0	0	0
Tempête 12	25/02/89	26/02/89	0	- Hauteur de vagues : + 10m - Vitesse vent : +150 km/h	0	0	0
Tempête 13	30/01/90	31/01/90	1	- Hauteur d'eau : 91 de coeff - Creux de 5 à 6m - Direction vent : S - SE - Vitesse vent : force 5 à 7 (de 30 à 60 km/h)	0	2	1
Tempête 14	07/02/96	08/02/96	0	- Vitesse vent : 65 km/h	0	0	0
Tempête 15	30/12/98	SD	1	/	0	0	0
Martin	27/12/99	30/12/99	0	- Vitesse vent : 122 km/h	0	0	0
Tempête 16	06/11/00	09/11/00	0	- Vitesse vent : 100 km/h	0	0	0
Tempête 17	07/12/00	08/12/00	0	- Vitesse vent : 90 km/h à Biarritz	0	0	0
Tempête 18	14/08/08	15/08/08	1	/	1	0	0
Klaus	23/01/09	24/01/09	0	- Vitesse, vent : 135 km/h à Biarritz	0	0	0
Tempête 19	09/11/10	10/11/10	1	- Hauteur de vagues : 12m à Anglet Vitesse vent : 80 km/h à Biarritz et Socoa	2	0	0
Quirin	15/02/11	16/02/11	0	- Hauteur de vagues : 6 à 8m	0	0	0
Tempête 20	20/01/11	SD	1	/	0	0	0
Tempête 21	15/12/11	SD	0	- Hauteur de vagues : 7m	0	0	0
Tempête 22	28/01/13	SD	0	/	0	0	0
Tempête 23	11/02/13	SD	0	- Vitesse vent : 100 km/h	0	0	0
Dirk	23/12/13	25/12/13	0	- Vitesse vent : 80 à 100 km/h	0	0	0
Hercules	04/01/14	07/01/14	1	- hauteur de vagues : 12,5 m à saint-Jean-de-Luz et 11,8 à Anglet - Vitesse vent : 96 km/h à Biarritz et 117 km/h à Socoa	2	2	2
Nadja	01/02/14	02/02/14	1	- Houle de 6 à 8m	2	0	0
Andrea	28/02/14	SD	0	/	0	0	0
Christine	03/03/14	05/03/14	1	- Hauteur de vagues : 10m	2	1	0
Tempête 24	24/02/15	24/02/15	0	- Hauteur de vagues : 8 à 9m	0	0	0



## Articles

Cette section contient les trois articles actuellement publiés pour valoriser le travail de cette thèse :

- L'article pages 112 à 118 correspond au travail réalisé au cours du chapitre 4. Celui-ci a été publié dans *Journal of Coastal Research* à l'occasion de la conférence ICS 2018 à Busan en Corée du Sud;
- L'article des pages 118 à 123 provient lui aussi d'un travail présenté lors de la conférence ICS 2018. Il présente les résultats du travail de recherche documentaire sur les dégâts résumé au cours du chapitre 5;
- Le dernier article (pages 123 à 128) est un travail annexe, brièvement résumé ci-dessous.

## Classification de tempêtes

Les données du modèle WWMII ont également été utilisées pour une étude morphodynamique des plages d'Anglet. Le but de ce travail a été de proposer un indicateur de risque pour la plage étudiée. Les données d'aléa ont été utilisées pour classifier les événements énergétiques en différentes catégories. Après sélection des événements avec un flux d'énergie important (quantile 99%), un clustering a été réalisé en fonction de la durée de l'évènement et de son flux d'énergie moyen. L'algorithme des k-médoïdes [42] a été utilisé pour obtenir 6 classes de tempêtes. Pour chacune de ces 6 classes, les valeurs caractéristiques de  $H_s$ ,  $T_p$  et  $\theta_m$  ont été déterminées. Ces données ont permis d'établir des simulations sur Xbeach [19] pour étudier l'impact de ce type d'évènements sur la plage considérée.

L'annexe pages 123 à 128 montre les résultats présentés lors d'une conférence à Busan en Corée du Sud lors du printemps 2018. Les résultats ne seront pas plus discutés ici vue la nature de l'étude un peu éloignée du sujet de ce document.

# A database to study storm impact statistics along the Basque Coast

Florian Arnoux<sup>†</sup>, Stéphane Abadie<sup>§</sup>, Xavier Bertin<sup>‡</sup> and Ivan Kojadinovic<sup>†</sup>

<sup>†</sup>LMAP  
FR 4155 MIRA  
Univ. Pau & Pays Adour,  
64000 Pau, France

<sup>§</sup>SIAME  
FR 4155 MIRA  
Univ. Pau & Pays Adour,  
64600 Anglet, France

<sup>‡</sup>UMR 7266 LIENS  
CNRS-Université de La Rochelle  
17000 La Rochelle, France



www.cerf-jcr.org



www.JCRonline.org

## ABSTRACT

Arnoux, F., ; Abadie, S. ; Bertin, X. ; Kojadinovic, I. 2018. A database to study storm impact statistics along the Basque Coast, *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018* (Busan, Republic of Korea). *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 85, pp. 11–15. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

A database aiming at studying storm impact on the French Basque coast and covering the period 1949-2015 is presented in this paper. Wave and water level data originate from synthetic or numerical hindcast complemented by buoys or tide gauge measurements. A statistical validation of each variable and, when needed, a distribution correction of biased variables was carried out. The constructed database will be used in confrontation with an historical review of past storm damages to try to find a statistical link between the two through a damage function.

**ADDITIONAL INDEX WORDS:** *storms impact, long-term database, wave hindcast, water level, quantile transformation*

## INTRODUCTION

Successive flooding events which occurred during winter 2013-2014 are considered among the most damaging ones that hit the French Basque coast in the last decades. These storms highlighted the need for local stakeholders to design adapted tools to better mitigate storm hazard. For this purpose, *damage models* or *functions* linking storm characteristics to the occurrence or not of damages and their magnitude would be very useful. This is one of the purpose of the European cross border project MAREA in which the present work is included.

Creating a damage model requires two databases: a first database containing values over a long time period of relevant geophysical variables such as wave parameters or water level, and a second database made up of historical information on past storm damages. The latter is presented in a companion paper (Abadie *et al.*, this issue). It was a particularly difficult work to carry out given the heterogeneity of the sources and the fact that damage information is often biased and/or incomplete. The present paper describes the construction of the geophysical database. It is based on two main sources: measurements from buoys and tide gauges, and simulated data from numerical models and reanalysis. Note that, since there are only a few storms each winter and many of them are harmless, both the geophysical and the damage databases need to span a long time period to be representatives. The first (resp. last) events in the damage database occurred around 1949 (resp. 2014). This implies that the geophysical database needs to span the same long time period.

The purpose of this article is to describe the aforementioned geophysical database and assess the quality of this data with relevant statistical indicators.

## METHODS

This work focuses on the Basque coast. The latter is a 200 km rocky coast facing the Atlantic Ocean stretching from the North West of Spain to the South West of France (Figure 1). It is a very touristic region exposed to energetic wave climate and meso-tidal

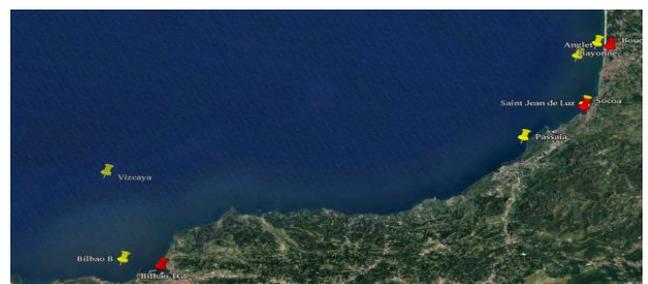


Figure 1: Locations of available observations (with Tide gauges in red and wave buoys in yellow) along the Basque coast.

regime.

The following geophysical variables describing the sea state at a given time and a given location are considered in this study: the significant wave height ( $H_s=H_{m0}$ ), the mean wave period ( $T_{M02}$ ). Wave parameters can be computed from the energy spectrum of buoy data. Wave data are completed by the sea water level. This parameter, of critical importance for coastal storm impact, is locally measured at tide gauge locations.

DOI: 10.2112/SI85-001.1 received ; .

\*Corresponding author: florian.arnoux@univ-pau.fr

©Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2018

Measurements from buoys and tide gauges are only available at specific locations and for limited time periods. Moreover, they can be characterized by device-specific biases and might also return biased measurements during extreme events. Figure 1 shows the spatial distribution of local measurements of waves and water levels along the Basque coast. They cover marine part in front of most inhabited parts of the Basque coast namely in the area of Bilbao and San Sebastian for Spain and Saint Jean de Luz and Biarritz for France. Table 1 details the time interval of the available data. Due to these limitations (*i.e.*, spatial and temporal limited coverage), these measurements are not, on their own, sufficient for a relevant statistical work to be performed. They can however be used to assess the quality of simulated data.

Name	Start	End	Missing data (%)
<b>Wave Buoys</b>			
Bayonne	09/11/1989	25/07/1994	50.6
Anglet	24/11/2009	Active	15.1
Saint Jean de Luz	24/04/2013	Active	8.7
Bilbao	21/02/1985	Active	17.5
Passaia	15/03/2010	23/05/2012	0.6
Vizcaya	07/11/1990	Active	4.3
<b>Tide Gauges</b>			
Boucau	22/05/1967	Active	18.2
Socoa	20/11/1942	Active	42.7
Bilbao	02/07/1992	Active	0.4

Table 1: Periods of activity for all measurements devices (buoys and tide gauge) along the French and the Spanish Basque Coast

Water level data is typically characterized by missing observations for rather long time periods. To solve this issue a simple reconstruction was considered to infer tide and surge respective contribution. This model make the sum of three components: the mean water level at time  $t$  (which is a moving average computed from monthly means of measure data), the tidal variation at time  $t$ , calculated from a tidal prediction carried out from harmonic analysis from tide gauges measurement, and the atmospheric surge at time  $t$ , which links the atmospheric pressure and surge observations. The last part of the model might be debatable since it captures more than just atmospheric effects (such as seasonal variations, winds, bias depending on the tide gauge location, etc.). Nevertheless, as presented further on,

overall, this rather simple model is sufficient to obtain accurate series of water level values for the period 1949-2015 at the considered tide gauge locations.

As regard wave data, two numerical wave models were selected to fill in the gaps in the observations and form the full geophysical database for the period 1949-2015

The first simulation, referred to as WWMII, covers the whole period spanning from 1949 to 2015. The hindcast was performed with a modeling system that couples the 2DH circulation model based on SELFE (Zhang et al., 2008) and the spectral wave model WWMII for waves (Roland, 2008). The configuration described in Bertin *et al.* (2015) was implemented over the whole North Atlantic Ocean, with a spatial resolution ranging from few tens of kilometers in the deep Ocean to 1 kilometer along the coast in the Bay of Biscay. The model was forced with wind and pressure fields originating from the NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay; 1996), thereby ensuring a good time homogeneity over the studied period. The model gives as a result, wave integrated parameters (significant wave height etc.) at a few points corresponding to measurements or in front of the main Basque coastal cities (in -100m and -15m depth).

As an alternative to the previous simulation data, and to allow for a comparison with up to date wave hindcast covering the same region, we also considered the so-called HOMERE dataset obtained from WAVEWATCH III (version 4.09) model with an explicit scheme and an the unstructured grid covering the Bay of Biscay (Roland, 2008). The parameters were chosen according to the configuration from previous calculations (Ardhuin *et al.*, 2010). The bathymetry was provided by the SHOM (Hydrographic and Oceanographic Department of the French Navy) from direct measurements. The forcing winds used in the model were extracted from the CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (Saha, 2010) and the currents and water levels used for modeling were computed with the MARS 2D model developed by IFREMER (Lazure, 2008). For comparison with measured data, when the buoys locations did not belong to the output grid, we considered the closest points to the buoys.

Simulations and direct measurements can be compared from several perspectives. There are tools for absolutely corresponding series (same size, same dates), but measurement time series are too short for the issues studied her. Distribution comparisons are used here in order to get a global analysis of each dataset.

As mentioned previously, direct measurements and simulations are simultaneously available only for several locations and sub periods. For a given location and common sub period, the quality of the simulated data can be assessed by standard statistical tools. Let  $(x_t)_{t \in T}$  and  $(\hat{x}_t)_{t \in T}$  be direct and simulated observations respectively of a geophysical variable of interest. For the present

paper the *bias*, the *root mean squared error* and the *determination coefficient* are computed.

Direct and simulated observations should also be compared in terms of distribution. Given a geophysical variable of interest and a given location:

- let  $T_1$  be the largest time period for which it has been directly observed and let  $(x_t)_{t \in T_1}$  be the corresponding available observations;
- let  $T_2$  be the largest time period for which simulations are available and let  $(\hat{x}_t)_{t \in T_2}$  be the corresponding available values.

Should the simulated observations be a good approximation of reality, the empirical distribution computed from  $(x_t)_{t \in T_1}$  should be close to the one computed from  $(\hat{x}_t)_{t \in T_2}$ . Let  $F_{T_1}$  be the empirical distribution function of  $(x_t)_{t \in T_1}$  and let  $\hat{F}_{T_2}$  be the empirical distribution function of  $(\hat{x}_t)_{t \in T_2}$ . Then, let  $F_{T_1}^{-1}$  and  $\hat{F}_{T_2}^{-1}$  be the corresponding quantile functions (computed using the method of linear interpolation, see `quantile(type=4)` function from R). To compare the series  $(x_t)_{t \in T_1}$  and  $(\hat{x}_t)_{t \in T_2}$  in terms of distribution, we compared  $F_{T_1}^{-1}$  and  $\hat{F}_{T_2}^{-1}$  on the grid  $\{u_i = \frac{i}{m}, i \in \{0, \dots, m\}\}$ .

In addition, we compared the kernel density estimates

$$f_{T_1}(x) = \frac{1}{h \times |T_1|} \times \sum_{t \in T_1} K\left(\frac{x - x_t}{h}\right) \text{ and } f_{T_2}(x) = \frac{1}{h \times |T_2|} \times \sum_{t \in T_2} K\left(\frac{x - \hat{x}_t}{h}\right), x \in \mathbb{R},$$

where  $K$  was taken as the Gaussian kernel and the bandwidth  $h$  was automatically computed as in the R function `density()` (R base function).

## RESULTS

At the Anglet buoy location, statistical indicators were computed for the significant wave height  $H_s$  and the mean period  $T_{m02}$ . Anglet buoy is located in intermediate depth (50m), 2 kilometers from the coastline and has been deployed by UPPA and CEREMA. Table 2 gives the results for both numerical models. They show good results for each indicator with a slight advantage for HOMERE, which can be explained by the fact that it uses higher resolution winds (0,20°/1h vs 1,8°/3h for NCEP winds). Note that HOMERE do not take into account the 2013-2014 events which was particularly energetic, this difference may also explain the difference between the two models.

	$H_s$ (m)		$T_{m02}$ (s)	
	WWMII	Homere	WWMII	Homere
BIAS	-0.112	-0.074	0.976	0.157
RMSE	0.484	0.302	1.869	1.027
$R^2$	0.730	0.846	0.353	0.716

Table 2: Statistics describing the adequacy between direct observations and simulated measurements for models WWMII and Homere at the Anglet buoy for the periods 2009-2015(WWMII) and 2009-2012 (Homere).

Quantile-quantile plots are given in Figure 2 for  $H_s$  and in Figure 3 for  $T_{m02}$ . As one can see, for  $H_s$ , the points do not lie on the diagonal  $y=x$  and the simulated measurements tend to underestimate the significant wave height for the largest waves. For  $T_{m02}$ , the adequacy between simulated quantiles and observed quantiles is much better.

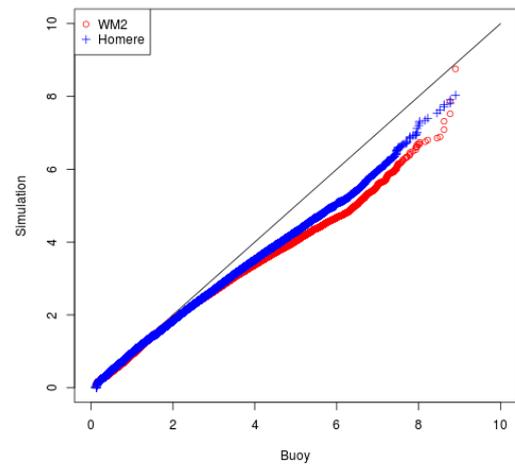


Figure 2: Quantile-Quantile plot for  $H_s$  (m) at the Anglet buoy point. The red circles represent the WWMII simulation and the blue crosses the Homere simulation.

Density functions for significant wave height are given in Figure 4 at Anglet buoy point for measurements and simulated data. As one can see, without any additional correction, the underlying distributions do not match perfectly. This prompted us to transform the simulated observations using the so-called probability and quantile transformations (see for instance Nelsen 2006). Specifically, starting from the series  $(\hat{x}_t)_{t \in T_2}$ , we formed the corrected series  $(\tilde{x}_t)_{t \in T_2}$ , where  $\forall t \in T_2, \tilde{x}_t = F_{T_1}^{-1}\left(\hat{F}_{T_2}(\hat{x}_t)\right)$ .

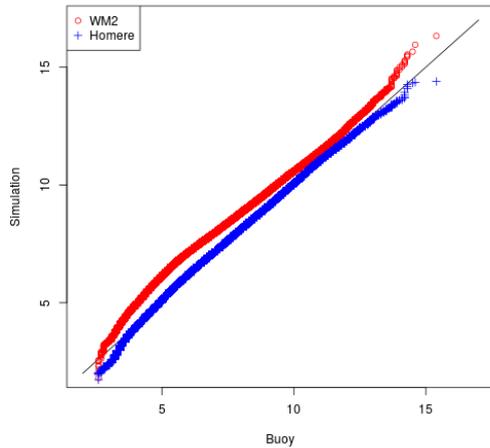


Figure 3: Quantile-Quantile plot for  $T_{m02}$  (s) at the Anglet buoy point. The red circles represent the WWMII simulation and the blue crosses the Homere simulation.

As one can see, in Figure 4, the dashed curve lying almost exactly over the measurement curve, the adequacy in terms of distribution between  $(x_t)_{t \in T_1}$  and  $(x_t)_{t \in T_2}$  is much better than the adequacy between  $(x_t)_{t \in T_1}$  and  $(x_t)_{t \in T_2}$ .

Buoy	$H_s$ (m)	$T_{m02}$ (s)
Bayonne	0.461	2.293
Anglet	0.484	1.869
Saint Jean de Luz	0.447	1.601
Bilbao	0.395	2.997
Passaia	0.482	2.252
Vizcaya	0.545	2.819

Table 3: RMSE computed for  $H_s$  and  $T_{M02}$  for all Basque Buoys for the WWMII model.

Table 3 summarizes the results of the RMSE between the six buoys and the WWMII simulation for  $H_s$  and  $T_{M02}$ . The significant wave height representation is approximately the same for all buoys, with same problems with the high waves. But for the mean period, the Spanish buoys are not as well represented as the French ones.

Figure 5 shows water level distributions at the Socoa tide gauge location. The black curve shows a kernel density estimate of direct observations (from a tidal gauge) while the red curve corresponds to a kernel density estimate of reconstructed

observations obtained using the method described in this paper. The direct observations were taken from the SHOM database. The pressure necessary for reconstructing the signal was taken from the NCEP/NCAR reanalysis. The two underlying datasets cover the same period but many observations are missing because of material failures and maintenance. As one can see from Figure 5, the two distributions seem very close, which validates the water level model at least in distribution. The other tide gauges show similar results, the three ones have RMSE around 10 cm which shows that the computation represents very well the water level on tide gauge locations.

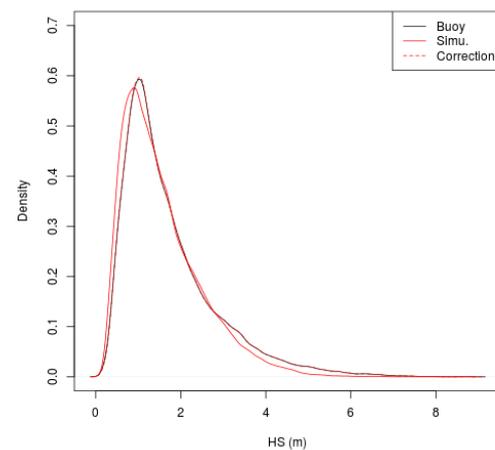


Figure 4: Density functions for the significant wave height ( $H_s$ ), the plain lines are functions estimated from the Anglet buoy measurements (black) and the WWMII model (red). The red dashed line is the density function estimated from the corrected WWMII

## DISCUSSION

The problem of inaccurately simulating large wave heights seems to be a common issue for spectral wave models, in the coastal zone as the two state-of-the-art models used here display a negative bias at the coastal buoy while being good in the deep Ocean (not shown). However, applying an empirical quantile transformation, make it possible to correct long term simulated data from direct observations. Clearly, this kind of correction is not possible at every location since direct measurements can only be available at locations where buoys data have been collected over a sufficiently long period of time. An additional assumption necessary for the aforementioned correction to make sense would be that the distribution of the geophysical variable of interest remains constant over the observation period. The latter may not necessary hold if long time periods are considered for instance due to climate change effects.

Despite our simple approach to reconstruct sea-level variations at the location of tide gauges, very good predictions were obtained. This might be explained by the fact that, in this part of the Bay of Biscay, the continental shelf is very narrow so that storm surges are dominated by the effect of atmospheric pressure (Bertin et al., 2012), a process that is well captured applying an inverse barometer approach.

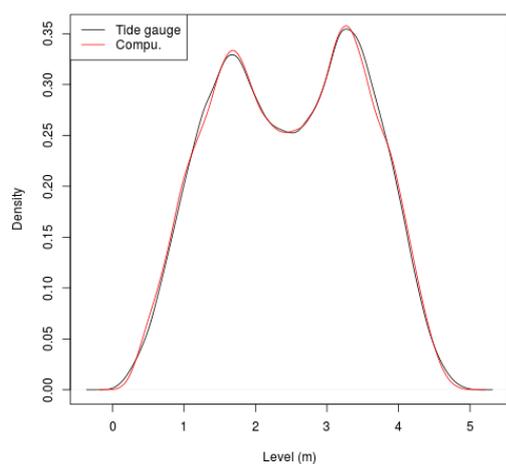


Figure 5: Density functions for the water level at the Socoa tide gauge point. The black line is the estimated function from the measurements, the red one is the estimated function from the computed values.

### CONCLUSION

All the recovered data for the Basque Coast are presented in this paper with validation tools to estimate how biased simulations are compared to measurement data. Wave data is not perfectly represented by models especially for high waves whereas the water level is complete. A correction method is therefore performed on significant wave height to match the measurement distribution.

The next step of this study is to try to determine a simple relationship between the geophysical variable series available in the formed database and the presence/absence of damage (Abadie *et al.*, This issue). We shall in particular focus on two locations: the Artha breakwater and the Grande Plage in Biarritz, which are close to the Saint-Jean de Luz and Anglet buoys, respectively. Finally, note that to try to explain the presence/absence of damage, it may be also meaningful to form new variables such the wave runup (Stockdon, 2006) or the energy flux from the geophysical variables.

### ACKNOWLEDGEMENT

The authors of this paper acknowledge financial support from the European POCTEFA program MAREA EFA046/15, the “extreme events” AST OASU and the initial funding source from the university of Pau and Pays Adour through the API program. Financial support from UPPA and CD64 for the PhD fellowship

of Florian Arnoux is gratefully acknowledged. Finally, the authors would like to thank Puertos del Estado AZTI Tecnalia and IFREMER for providing access to some of the data used in this analysis.

### LITERATURE CITED

Abadie, S. ; Beauvivre, M. ; Egurrola, E. ; Bouisset, C. ; Degremont, I. and Arnoux; F 2018. A database of recent historical storm impact on the French Basque coast., Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS)2018 (Busan, Republic of Korea). Journal of Coastal Research, Special Issue No 85.

Ardhuin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. V. der Westhuysen, P. Queffelec, J.-M. Lefevre, L. Aouf, F. Collard. (2010). -Semi-empirical dissipation source function for wind-wave models: part 1, definition, calibration and validation at global scales. J. Phy. Oceanogr. 40:1917-1941.

Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.F., Fortunato, A.B. and Karpytchev, M., 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, Bay of Biscay. Ocean Modelling 42 (4), 16-30.

Bertin, X., Li, K., Roland, A. and Bidlot, J.-R., 2015. The contribution of short waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay. Continental Shelf Research 96, 1-15.

Kalnay, E. et al (1996), The NCEP/ NCAR reanalysis project, Bul. of the American Met. Soc. 77, 437-471.

Lazure P., Dumas F. (2008). -An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances In Water Resources, 31(2):233-250.

Nelsen, R. B. (2006), An Introduction to Copulas. 2nd edition. New York: Springer.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Roland A. (2008). -Development of WWM II: Spectral wave modelling on unstructured meshes. Ph. D. thesis, Inst. of Hydraul. and Wave Resour. Eng., Techn. Univer. Darmstadt, Germany.

Saha S., (2010). -The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bul. Amer. Meteor. Soc., 91:1015-1057.

Stockdon HF, Holman RA, Howd PA, Sallenger AH Jr (2006) Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coast Eng 53(7):573-588.

Zhang, Y.L., Baptista, A.M., 2008. SELFE: a semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. Ocean Modelling. 21, 71-96.

# A database of recent historical storm impact on the French Basque coast

Stéphane Abadie<sup>†\*</sup>, Marion Beauvivre<sup>‡‡</sup>, Estelle. Egurrola<sup>†</sup>, Christine Bouisset<sup>‡</sup>, Isabelle Degremont<sup>‡</sup>, Florian Arnoux<sup>†§</sup>

<sup>†</sup>SIAME Laboratory  
FR 4155 MIRA  
Univ. Pau & Pays de l'Adour  
64600, Anglet, France

<sup>‡</sup> PASSAGE  
FR 4155 MIRA  
Univ. Pau & Pays Adour,  
64000 Pau, France

<sup>§</sup>LMAP  
FR 4155 MIRA  
Univ. Pau & Pays Adour,  
64000 Pau, France



www.cerf-jcr.org



www.JCRonline.org

## ABSTRACT

Abadie, S. ; Beauvivre, M. ; Egurrola, E. ; Bouisset, C. ; Degremont, I. and Arnoux; F 2018. A database of recent historical storm impact on the French Basque coast. *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018* (Busan, Republic of Korea). *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 85, pp. 6–10. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

A coastal storm damage database covering 64 years was built based on press and archives investigations. Flooding of Biarritz La Grande Plage sea front and related damages were characterized with a three level index along with binary reliability indicator. Damages to breakwaters protecting Saint Jean de Luz bay were also documented. Building such a database appeared to be extremely time consuming and also implies some limitations mainly due to the heterogeneity and incompleteness of the data sources. 30 flooding events were reported for Biarritz among which the five most destructive ones were December 28-29, 1951, November 9-10, 2010 and January 4-7, February 1-2, March 3-5, 2014. This clearly shows the extreme character of winter 2014.

**ADDITIONAL INDEX WORDS:** *Storm, damages, flooding, press articles, archives.*

## INTRODUCTION

Mitigating coastal storm impact is a common concern of countries with maritime borders. In the future, the problem will become more and more acute due to the growing coastal population and associated infrastructures and the climate change effects. The type of damages which may be generated by coastal storms, if we except direct wind effect, not considered in this study, ranges from: damages on coastal defenses such as breakwaters, jetties, etc., seawall flooding/overtopping inducing damages on buildings or infrastructures lying behind the protection, beach erosion which may be considered as a direct damage (touristic value) and a pathway for subsequent flooding.

Trying to relate storm characteristics (waves, water levels, etc.) to damage type and magnitude (i.e., building a “damage function”) is a complex task which requires extensive database of storm variables and the corresponding damages to the coast. If the former can be relatively easily obtained by hindcast simulations for instance, the latter is more difficult to build. To that purpose, insurance data may, for instance, be considered ((Andre *et al.* (2013), Gaztelumendi *et al.* (2014), Naulin *et al.* (2016)). Up to now, the only information available on coastal storm damages on the Basque coast was provided by the CATNAT database (e.g., Chevillot-Miot and Mercier, 2014). The latter collects all the official recognition by the French government of a natural disaster state in a specified city. The CATNAT database includes different disaster categories. There are for instance only seven recognitions in Biarritz, France (Figure 1) in the “flooding and

shocks linked to the wave mechanic action” category. It is the purpose of the present work to complement this previous information by more detailed data obtained from archives and press articles investigations.

## METHOD

The impact of coastal storm along the French Basque coast (Figure 1) is studied in this paper. The latter is a 50 km rocky coast lying in the South West of France close to the Spanish border. We specifically focused on two strategical sites. First the so-called Biarritz “grande plage” (Figure 2, top panel), touristic seaside resort where hotels, casino, infrastructures are often damaged by storms. Second, two composite breakwaters, protecting the entrance of the Saint Jean de Luz Bay (Figure 1): the so-called “Artha” and Socoa breakwaters. The first one is a detached breakwater lying in about 10m deep waters while the second one is attached to the coast and close the western part of the bay in shallower waters (Figure 2, bottom panel). The first part of the research is devoted to flooding of urbanized coastal area during storms and related damages (by mechanical wave action during high water level). A database collected from archives over the period 1950-2014 along the Basque coast has been carried out in order to find out historical coastal flood events at local level. The main data sources were provided by a systematic search in national and local press, particularly the regional *Sud-Ouest* newspaper, and in public archives kept by government representatives, public bodies and local authorities.

DOI: 10.2112/SI85-001.1 received \*\* \*\*\*\* 2017; accepted in revision \*\* \*\*\*\* 2018.

\*Corresponding author: stephane.abadie@univ-pau.fr

©Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2018



Figure 1: Left panel : location of the French Basque coast at the european scale. Right panel : map of the French Basque coast with locations of the two studied sites

The methodology was inspired by the French Cocorisco project (Henaff and Philippe, 2014) on coastal risks and built on previous experiences of historical disasters archive search and mapping lead by part of the team (e.g., Bouisset *et al.*, 2003). The public archives are usually organized by cities, public departments, periods (generally several years) and very general topics (“public security”, “roads”, “letters”, “disasters”, etc.). Subsequently, the search on specific topics such as storm damages is a very time-consuming task. In order to test the methodology, we decided to collect any information on the Basque coast (to avoid repeating the same tasks for further researches) but to concentrate the deepest investigation on Biarritz city.



Figure 2: Top panel : Photograph of the Grande Plage of Biarritz showing the south part of the casino. Bottom panel : Photograph from the north side of the Saint Jean de Luz bay entrance displaying the two studied breakwaters (detached breakwater Artha and Socoa breakwater in the far field on the south side of the bay).

The press analysis was carried out by using *Europresse* and *Factiva* online databases for the most recent period and “traditional” press archives for events earlier than 1990’s. Indeed, the searches are long and go through the use of many keywords. For each place, the name of the city was associated with the following keywords: storm, waves, swell, flooding or damages (eg. “Biarritz+storm”, “Biarritz+flooding”, etc.). As old newspapers are not available on-line and are only classified by date in the archives, we also made a systematic analysis of the

*Sud-Ouest* journal daily front pages to identify the events that occurred before the 1990’s. Secondly, we tried to find the complete press coverage on identified storms by adding systematic searches from the date of the event to 15 days after. The documents we collected provide different kind of information on historical events: hazard description, damage description, information on crisis management, emergency and recovery measures. They mostly offer qualitative information sometimes mixed with more quantitative ones: “the waves were very high”, “the wind was blowing furiously, up to 110 km/h...”. Most of the documents focus on damage description, emphasizing floods and storms consequences, rather than hazards’ “scientific” description. And the direct cause of each damage (wind, wave...) is not always clear. In parallel, archives from governmental representatives (e.g., maritime local department) and local authorities (mainly city and council archives) were also studied. The information provided in this category is more quantitative as it is often focused on post storm damage assessment.

The information was manually entered in a qualitative database, each event mentioned by a document corresponding with one line: the same document sometimes mentions different storms (eg. “This storm is worse than the one which occurred last year and destroyed...”) and we created one line for each event in order to gather any information available. The database was designed, tested and improved in order to allow events localization at a very local scale, damage assessment, a later GIS mapping and, if necessary, a step backward to the original information with the entry of the most representative quotes and texts extracts. Different fields were filled to describe 1) the document; 2) the event it mentions; and 3) its consequences (victims, damage, emergency and recovery measures). In total, the database has more than 250 entries on the Basque coast in general and 92 entries for Biarritz alone. As important storms with major losses are generally mentioned by different sources and documents, the information was cross-checked and synthesized in order to verify data on damages and assess the global impact of each event.

Further analysis showed that the database also included storms which were not primarily defined by their wave power or water level but more by the intensity of the wind and the rain falls. To identify this subset we compared our hindcast data (Arnoux *et al.*, 2018) with the description of the hazard parameters found in the archives. Storms for which only wind and rain were quoted in the archives and for which hindcast data did not give remarkable value (quantile less than 0.9) for wave height and water level, were eliminated from the database.

Three documents were then extracted from the remaining dataset. First, a storm catalog, gathering all the storm events at the Basque Coast scale. For each event, cities primarily affected by the storm are indicated and when flooding occurred, in which city this flooding was reported. The description of the hazard parameters (wind, rain, wave, water level) and of the damage observed, when present in the archive, are also added to the catalog. To be able to directly find the important information about the event, a snapshot of the press article or the archive is also put in the document.

Finally, and critical to elaborate a damage function, an assessment of flooding occurrence and the related damage was carried out. For this, we focused on the Grande Plage area in Biarritz for which the most continuous information series was collected. We tried to find evidences of flooding or of non-flooding. Events which induced flooding at the Grande Plage were marked by a 1 index and 0 in case of non-flooding. A confidence index (1: reliable, 0: low reliability) was added to this information for further efficient statistical processing. The same analysis was performed for damage intensity. A three level scale (2 for significant damages, 1 for moderate and 0 for no damage) was chosen as being the most suited to the data. A confidence index on this value was also added for further processing. At the end of the event description, information on whether or not the event was categorized as CATNAT and if during the storm, protection measures (i.e., building of temporary sand breakwater in front of the casino) were undertaken, was added.

The two other documents are tables, one at the basque coast scale and a second one focused on Biarritz city summarizing the catalog information. The first one mainly includes cities affected by each event and a binary index for damages (0=no damage, 1=damages). This table may be useful for instance for a more global statistical analysis or numerical modeling benchmarks. The table focused on Biarritz summarizes the catalog information plus a more detailed investigation of damages by categories (i.e., roads and sidewalks, private buildings receiving public, public buildings, shops and port infrastructures) based on the same 3 level scale.

The second part of the research focused on damages on coastal structures in intermediate depths by direct wave impact. The two breakwaters (Artha and Socoa) presented in the site section are currently maintained by the council of the Pyrénées Atlantiques, where archives especially reporting repair actions may be consulted. We analyzed seven archive files including information on the two breakwaters from 1943 to 1987. These information were complemented by numerical archives since 1987. Surprisingly, the latter were less detailed and comprehensive than the older ones. The information found in these archives are two folds : first, the number of parallelepiped concrete blocks, 50 tons each, built and added each year to the existing block armor unit to counteract storms effect. Second, the amount of masonry repair on the concrete caisson. To assess the number of blocks to be added each year, the Atlantic Pyrenees Council (i.e., CD64), in charge of the breakwaters, proceeds in three stages: Bathymetry measurements for the submerged part of the breakwater, topography for the emerged parts and divers' inspection inside existing cavities. Nevertheless, it is unlikely that these operations were conducted systematically. And one also have to consider that a minimum block amount was always put in water each year to maintain the structures whatever its actual state at the end of the year. Masonry repair amount were less regular than yearly immersed block numbers. Anyway the information was also added the database. Finally, it was necessary to update the monetary values in order to have comparable information over

time. For this, we used the "Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques" website (<https://www.insee.fr/>), taking into account year 2016 as year of conversion.

## RESULTS

34 storms involving large waves were reported for the period 1950-2014 at the Basque coast scale among which more than one third (i.e., 13 events) generated noticeable damages at the coast. 14 flooding/overtopping events were reported at the same global scale. Biarritz is the city which appear the most often in the document mainly due to the keywords used during the research but maybe also because Biarritz has important assets and highly touristic image. Otherwise, the other cities of the coast (i.e., Anglet, Bidart, Guetary, Saint Jean de Luz, Ciboure, Hendaye) also regularly appear in this classification.

The number storms for which only Biarritz was quoted is 30 and the number of flooding events at the Grande plage is 13 which also give more than one third of the storms. Among these flooding events, only 2 are considered as non reliable. As for the non flooding events, the information is most of the time considered as non reliable. In only 2 events, flooding is ruled out with confidence. These two events are as important as the one involving flooding as they will be used later as a reference for testing hazard parameters combinations (wave height, water level) for which flooding does not occur (conversely to the other ones). And by this way, this kind of cases will help us to locate the limit between flooding and non flooding. Regarding damages due to flooding, 5 events were found to generate level 2 damages with high reliability. 4 generated moderate damages with one assessment considered as non reliable. The rest of the 30 storms generated no damages with generally a good degree of confidence. Storms which generated the main damages (level 2) subsequently to flooding are the December, 28-29 1951 event, November 9-10, 2010 event and the recent events of winter 2013-2014 : namely storms Hercules (January 4-7), Nadja (February 1-2), Christine (March 3-5).

Figure 3 shows snapshots of archives extracted from the storm catalog. The left photograph comes from an article in the *Sud Ouest* journal paper related to the January 30 1990 storm. The photograph shows the flooding of the Grande Plage searoad located just in front of the casino during this day. For instance in this case, flooding is obvious (flooding index 1) and the reliability of this information is good (reliability index 1). The right panel of Figure 3 shows photographs of damages at the Biarritz casino facade subsequent to Hercules storm (January 2014). The damages, known to be due to flooding (flooding 1, reliability index 1), are significant (level 2) and the reliability index is good (1).

There are other types of archives such as repair estimations which are also evidence of flooding events and induced damages. For instance Figure 4, left panel, shows a repair estimation for the Biarritz casino after the 1951 event which explicitly mention that glass windows, wood door, etc. were broken in the casino facade. In the same figure, the right panel shows, for the same storm,

locations of damages on the seafront walking way which witnesses the effect of flooding and wave action.



Figure 3 : Example of archive evidences of flooding and related damages. Left panel : snapshot of a Sud Ouest article related to the January 30, 1990 storm event (evidence of submersion). Right panel : snapshots of damaged casino (Biarritz Grande Plage) after Hercules storm January 4-7 2014 (evidence of damage ranked (2 on the scale damage)).

As for Artha and Socoa breakwaters, the most relevant informations found in the archives were the number of blocs yearly added to the two breakwaters to counteract the winter storms action and the overall masonry repair costs. This information is summarized in the curve presented on Figure 5. Repair costs were only archived up to 1983 whereas the number of yearly immersed blocks covers the whole period. Vertical lines show years with exceptionally strong storms as reported by the staff in charge of the breakwaters maintenance. Masonry repair costs show more variability before 1968 with extreme values reached during and right after the well-known important storms of 1951 and 1965. Concrete blocks yearly added to the block armor units show the same trend with lower amount and lower variability after 1968 and a stabilization of this number after 1988. On this parameter, the influence of the historical storms is only obvious for 1965. After 1988, the maintenance strategy may have changed in favor of a more regular block input rather than adaptation to yearly climate. This assertion would need to be confirmed by staff in charge of the breakwaters.

## DISCUSSION

The starting point of this study was our inability to really assess the impact of winter 2013-2014 as no storm history record was available. From this point of view, the present work allows us to show that, in terms of damages, winter 2013-2014 was unprecedented in the last 60 years, involving 3 category 2 flooding storms while the all period only counts 5 of this type of storms. Note that preventive measures were taken during this year (i.e., temporary sand dikes) but they did not prevent significant flooding and damages to occur due to the extreme characteristics of these three storms. One of the difficulty of the research performed here is the heterogeneity of the data sources. Most of

them comes from the press. The description of extreme events and disasters given by press articles is less precise than the ones produced by researchers, local authorities in charge of coast protection or insurance companies. As article redactors are not experts, the vocabulary used to describe storms, submersions and damage is often vague, unclear and even inadequate. Nevertheless, the numerous photographs press articles offer, allow in some cases an accurate assessment of the situation. And while the other sources often only focus on economic losses, they place more emphasis on hazard description and recovery measures too. The press also provides information on earlier periods than insurance companies. Local archives often give quantitative assessment of damage through quotations for instance. But the main problem is that the archiving by public administrations and local authorities, which is theoretically compulsory, is not in fact systematic: the public archives are unfortunately very incomplete. This is why it is essential to use the different documentary sources available. However the use of different sources make it complex to define a reliable damage indicator. Here a simple three levels indicator mainly based on material damages was chosen. Inclusion of fatalities was not possible due to first, the low numbers fortunately involved in this site, and second, because the presence of fatalities or injuries is not always directly correlated with the intensity of the phenomenon. Indeed, they may be more related to inappropriate behaviour than to the severity of the hazard itself. As they have attracted attention, the storms that caused the most damage are most likely to be listed, but it is not impossible that minor storms and damage could not be recorded. Comparing with the CATNAT classification, some discrepancy are for instance found in the present work. Indeed, there is a CATNAT recognition for November 1982 event which does not appear in the present dataset. Likewise, storms Martin (December 27-30, 1999) and Klaus (January, 23-24, 2009) are CATNAT labeled events but they were not found to generate flooding damages in our research. Conversely, the events of 2010 and winter 2014 were indeed recognized as CATNAT events. These differences may be due to the fact that the CATNAT label does not make the difference between damages from flooding and wave impacts on structures such as breakwaters for instance. Finally, damages to coastal structures appear difficult to characterize. Even on a single site, uncertainties linked to staff discontinuity, operational strategy changes as well as inaccuracy in monetary value or material volumes involved may mask the sought trend.

## CONCLUSIONS

A database of storm impact on the French basque coast over the last 60 years was built in the present work with emphasis on Biarritz Grande Plage and Saint Jean de Luz breakwaters. The following conclusions can be drawn from this research :

- 30 flooding events were collected for Biarritz La Grande Plage. These events were characterized in terms of flooding occurrence and damage level with reliability indicators.

- Storm impact on Saint Jean de Luz breakwaters appeared difficult to characterize due to integrated character of the informations collected.
  - Building this kind of database is very time consuming and the data collected still have a large degree of uncertainty.
  - From this data, winter 2014 appear as the most destructive for Biarritz at least over the last 60 years.
- The next step of the present research work will be to try using this database to compute damage functions (i.e., relating storm parameters to quantitative damages).

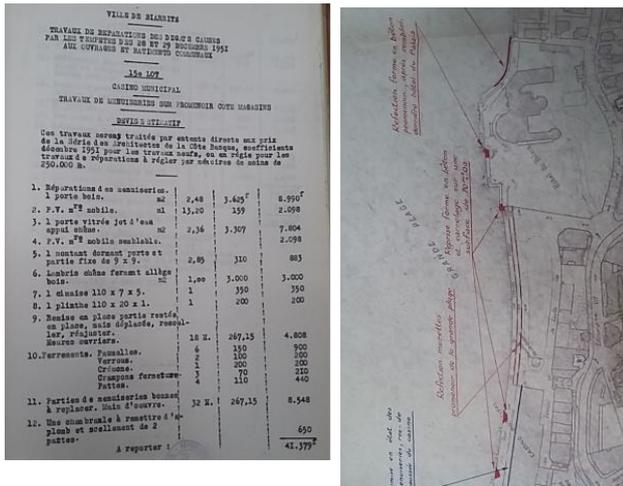


Figure 4: Biarritz casino, 1951 storm aftermaths. Left: Example of repair assessment (In French) proving flooding and damages by explicitly mentioning structural damages which may only be explained by flooding. Right: locations of damages on the seafront walking way.

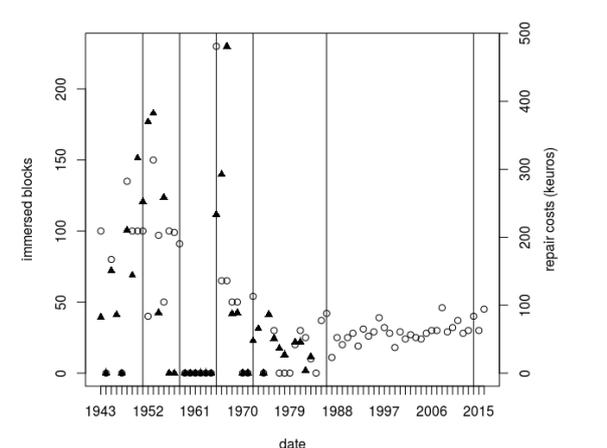


Figure 5: Time evolution of (o) yearly immersed blocks and (▲) masonry repair costs at Artha and Socoa breakwater. Vertical lines mark years involving outstanding storms.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors of this paper acknowledge financial support from the European POCTEFA program MAREA EFA046/15, the “extreme events” AST OASU and the initial funding source from the university of Pau and Pays Adour through the API program. Financial support from UPPA and CD64 for the PhD fellowship of Florian Arnoux is gratefully acknowledged. Finally, the authors would like to thanks local authorities for their help in collecting the data and especially Alain Roudil for fruitful discussions.

**LITERATURE CITED**

Andre, C.; Monfort, D.; Bouzit, M. and Vinchon, C., 2013. Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings: insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2003-2012.

Arnoux, F.; Abadie, S.; Bertin, X., and Kojadinovik, I, 2018. A database to study storm impact statistics along the Basque Coast. *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS 2018), Busan South Korea, Journal of Coastal Research*, Special Issue n°.

Beauvivre, M. 2016. 50 ans de tempêtes sur le littoral Basque. Master Thesis. 113p. In French.

Bouisset, C.; Degremont, I.; Puyo, J-Y., 2003. *Contribution à la cartographie historique des phénomènes naturels à risque dans les Hautes-Pyrénées*, Laboratoire SET, Univ. Pau & Pays Adour, *Technical report*, 32 p. In French.

Chevillot-Miot, Elie and Mercier, Denis, 2014. La vulnérabilité face au risque de submersion marine: exposition et sensibilité des communes littorales de la région Pays de la Loire (France). [VertigO] *La revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 14, no 2. In French.

Egurolla, E., 2017. Les tempêtes et les phénomènes de submersions marines sur la côte Basque. Internship report. 44p. In French.

Henaff, A. (ed); Philippe, M. (2014). *Gestion des risques d'érosion et de submersion marine, Guide méthodologique*. Projet Cocorisco. 156 p. In French.

Gaztelumendi, S.; Egaña, J.; Gelpi, I. R.; Carreño, S.; Gonzalez, M., Liria, P., Rodriguez; G., Epelde; I., Rubio, A., and Aranda, J.A., 2014. Characterization of coastal-maritime severe events in Basque Country, *7th EuroGOOS Conference*. 28–30 October 2014, Lisboa, Portugal.

Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; and Thieken, A., 2010. Review article "Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697.

Naulin, J. P.; Moncoulon, D.; Le Roy, S.; Pedreros, R.; Idier, D.; and Oliveros, C., 2016. Estimation of insurance-related losses resulting from coastal flooding in France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(1), 195-207.

# Risk mapping assessment by means of probabilistic storm scenarios in a partially engineered beach: Anglet, France

Iñaki de Santiago<sup>†\*</sup>, Denis Morichon<sup>†</sup>, Florian Arnoux<sup>†</sup>, Matthias Delpy<sup>§</sup>, Irati Epelde<sup>\*</sup>

<sup>†</sup> SIAME Laboratory FR 4155 MIRA  
Univ. Pau & Pays de l'Adour  
Anglet, France

<sup>\*</sup> Marine research division  
AZTI-tecnalia  
Pasaia, Spain

<sup>§</sup> Centre Rivages Pro Tech  
SUEZ EAU FRANCE  
Bidart, France



www.cerf-jcr.org



www.JCRonline.org

## ABSTRACT

de Santiago, I., Morichon, D., Arnoux, F., Delpy, M., and Epelde, I., 2018. Risk mapping assessment by means of probabilistic storm scenarios in a partially engineered beach: Anglet, France. *In*: Shim, J.-S.; Chun, I., and Lim, H.-S. (eds.), *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018* (Busan, Republic of Korea). *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 85, pp. 1–5. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

The characterisation of storms and the associated damage level is essential to design correct risk mitigation strategies. The study site, an engineered beach located in the South West of France, is exposed to frequent storm events. The objective of the present work is twofold: (1) to obtain a risk map along the different sectors of the beach and (2) to find risk indicators suitable for the present study site. The storm scenarios are obtained from a hindcast database that includes 66 years of wave parameters. Six storm types have been chosen to be representative of the extreme wave climate of the study site based on the energy flux (EF) threshold. The beach response to storm events is alongshore non-uniform and closely linked to the cross-shore position of the seawall. Total storm power combined with water level and beach volume/width seems to be the best set of risk indicators for the present study site.

**ADDITIONAL INDEX WORDS:** *Coastal risk, storm classification, numerical modelling, engineered beach.*

## INTRODUCTION

Population densities along the coastal areas are not only higher but also continue to grow faster than those inland (Neumann *et al.*, 2015). These areas are exposed to the action of the sea and, therefore, they are vulnerable to extreme events. Many cases evidencing such problematic were recorded during the last decades in the Atlantic ocean, like for example; the super storm Sandy (2012) in the North-Western side of the Atlantic ocean that caused a vast destruction in the mid-Atlantic states of the USA (Clay *et al.*, 2016), storm Xynthia (2010) that affected the entire coast of Southwestern Europe (Bertin *et al.*, 2012) or the more recent storm Hercules (2014), that caused relevant erosional and flooding events in France and the United Kingdom (Masselink *et al.*, 2016). Additionally, future scenarios might be worse due to sea level rise and change in intensity and frequency of storms. To have the skill to correctly forecast the beach response during high energy conditions is thus of great societal relevance and fundamental for developing an appropriate strategy for coastal management and planning.

The impact level of storms in coastal area, relies on storm conditions and system morphology interacting at different spatial and temporal scales. In particular, the impact of storms on beaches will depend on the forced coastal hydrodynamics (Loureiro *et al.*, 2012), such as wave characteristics and water levels, the nature of the system (Castelle *et al.*, 2015), such as beach characteristics and bar morphologies, and the balance between storm frequency and recovery rates (Karunarathna *et al.*, 2014). A deep analysis of wave climate conditions along with the estimation of storm-damage using schematic visualization, like for example flooding maps (*e.g.* Vousdoukas *et al.*, 2016) or

damage level maps (*e.g.* Armaroli and Duo 2017), is an ad hoc approach that could facilitate the decision-making process at the time of protecting a coastal zone.

Following this line, during the last decade the risk indicator concept has emerged as a tool to promote the interaction between scientific community and managers in application-oriented knowledge development (Carapuco *et al.*, 2016). A risk indicator provides information on the potential storm impact, helping to identify and prioritize vulnerable regions (Nguyen *et al.*, 2016). Due to the existence of a numerous of risk indicators (Ferreira *et al.*, 2017), the challenging task resides in the selection of the relevant indicator to anticipate the damage of a given hazard. The most widely used risk indicators are shoreline/baseline position, shoreline evolution, beach/barrier elevation or beach slope for coastal erosion and flooding hazards (Carapuco *et al.*, 2016).

The objective of this work is 1) to develop a catalogue of storms and study their consequences on the beach of Anglet and 2) to relate the storm impacts with morphological parameters of the beach to be used as site specific coastal risk indicators.

## STUDY SITE

The study site (Anglet beaches) is located in the Bay of Biscay, SW France (Figure 1). It is composed by a series of beaches stretching over a length of 4 Km. The Anglet beaches are bounded by a rocky headland in the South and a 1 Km long jetty at the entrance of the Adour river in the North. The study focuses on the southern sector (~2.5 Km). This sector is backed by a 1-km long seawall associated with a series of groynes, which were constructed during the last decades to mitigate the

beach erosion. These groynes extend about 100 m seaward. The beach face slope is steep ( $\sim 1/10$ ) and composed by medium coarse sand. It is an intermediate beach that is double barred most of the time (Huguet *et al.*, 2016).

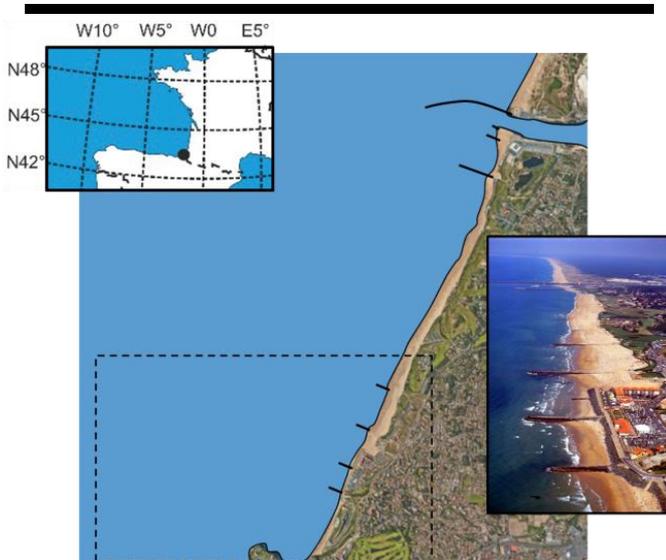


Figure 1. Study site (Anglet beach, Basque Coast, SW France). The region of interest is located inside the dashed square.

## METHODS

To carry out the present study, a wide variety of field measurements were taken, and both statistical and process based models were applied.

### Beach topo-bathymetry

A total of seven topo-bathymetries were measured from 2013 to 2016. The measurements were carried out either in early fall or early spring, to have the winter and summer morphological templates of the system. A multibeam echosounder to measure the bathymetry and a DGPS to measure the topography were used during the campaigns. A  $\sim 25$  m spaced transects were measured along the system with a cross-shore resolution of  $\sim 1$  m. The bathymetry used for the numerical simulations corresponds to the averaged topo-bathymetries taken during early spring. Hence, this bathymetry represents the modal state of winter conditions.

### Wave and tidal data

Wave characteristics (significant wave height  $H_s$ , peak period  $T_p$  and peak direction) were obtained from a wave-current coupled model between SELFE and WWMII (Bertin, 2015) at the coordinates  $043^\circ 29' 27.63'' N$   $001^\circ 33' 54.46'' W$ . Tidal statistics were extracted from the Adour tidal gauge located at 2 km from the study site.

### Numerical model and grid

The XBeach morphodynamic model (Roelvink *et al.* 2009) was specifically developed to simulate sandy beach changes during extreme events. This time-dependent and process-based

2DH model solves coupled hydrodynamics and morphodynamics equations on the time scale of wave groups, including the contribution of infragravity waves that have shown to be significant in runup processes during storms (Van Thiel de Vries *et al.* 2008).

All simulations were carried out in 2D mode on an alongshore regular ( $\Delta y = 10$  m) and cross-shore irregular grid ( $\Delta x = 10 - 0.5$  m). Model parameters were obtained from a calibration process. All parameters were set to default values except for  $\gamma = 0.4$ ,  $\gamma_{ua} = 0.35$ ,  $\epsilon_{ps} = 0.1$  m,  $h_{min} = 1$  m. The calibration results gave rmse errors of  $\sim 0.25$  m.

### Storm impact regime mapping

The potential impact of the storm is defined by the scale of Sallenger (2000). This method allows to relate external forcings to foreshore beach resilience on a relatively simple manner. The scale has already been successfully used to assess the thresholds for storm impacts on sandy beaches with and without coastal structures (de Santiago *et al.*, 2017; Almeida *et al.*, 2012). The scale distinguishes between four different storm impact regimes: (1) swash regime, which corresponds to the extent of beach flooding during storms; (2) Collision regime that can cause dune erosion or structure interaction; (3) Overwash regime that can cause onshore sediment transport and wave overtopping and (4) Inundation regime where beach and dune or seawall are constantly under water.

The distinction between the storm impact regime is based on the relationship between representative high ( $R_{high}$ ) and low ( $R_{low}$ ) elevations of the landward margin of swash, and elevations of the highest ( $D_{high}$ ) and lowest ( $D_{low}$ ) part of the first line of defence of the case study. In this study,  $D_{low}$  is defined as the seawall toe (intersection between seawall and top of the beach) and  $D_{high}$  as the elevation of the seawall crown.

### Storm classification

The characterization of the storm climate of the study site was performed based in a statistical analysis of the wave data. The method, consists in three steps; Step 1: a selection of extreme events based on a threshold value (1% of occurrence) of the wave energy flux was performed. Step 2: based on the storm mean energy flux and the duration of the storm a clustering process was carried out. The chosen cluster method was partitioning around medoids also known as k-medoids (with a fixed number of cluster  $k=6$ ) (Kaufman and Rousseeuw, 1990). This method although similar to the k-means method, has shown to be more robust to noise and outliers. Step 3) an analysis of the intra storm parameters of each group was performed. Finally, the representative  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta$  and duration of each storm cluster synthesised into a storm catalogue.

## RESULTS

The results of the present paper are divided in three different sections; 1) Extreme wave climate of the study site, 2) storm impact mapping along the beach of Anglet and 3) risk indicators.

### Storm characteristics

A total of six storm types were defined to be representative of the study site (Table 1). Type 4 (S4) and Type 6 (S6) storms, are the two most energetic in terms of cumulative storm power

( $\Sigma$ Power) but differ in their average duration (3 days against 1,5 respectively). They are only present during winter and fall seasons consequently they may coincide with both winter and fall equinox spring tides as well as with onshore directed winter winds. Type 2-3 and 5 (S2-S3-S5) are average extreme events of 1 day duration approximately. They are present during fall, winter and spring seasons. Storm 1 (S1), is the weakest storm type with an average duration of 9 hours. It is the only storm type present during summer period when the North Atlantic wave climate is dominated by mild conditions. Storm direction hardly varies between storm groups, presenting a main direction of  $300^\circ$  (mean directional spreading of  $15^\circ$ ).

Table 1. Storm cluster characteristics.

Storm	Power [kW/m]	Duration [h]	Hs[m]	Tp [s]	$\Sigma$ Power [kW/m]
S1	137.9	9	4.6	15.3	1241.1
S2	151.1	21	4.9	15.4	3173.1
S3	172.6	30	5.2	15.6	5178
S4	172.1	69	5.2	15.4	11874.9
S5	204.4	33	5.6	16.3	6745.2
S6	248.9	36	6.2	15.9	8960.4

**Storm impact regime mapping**

The impact regime was analysed along 13 sectors of the beach. These sectors were considered to represent all the distinctive features of the system, such as, bar location, beach slope or dry beach width. The presence of groynes generates sub-systems along the beach, because of that, at least 2 sectors per sub-subsystem were defined.

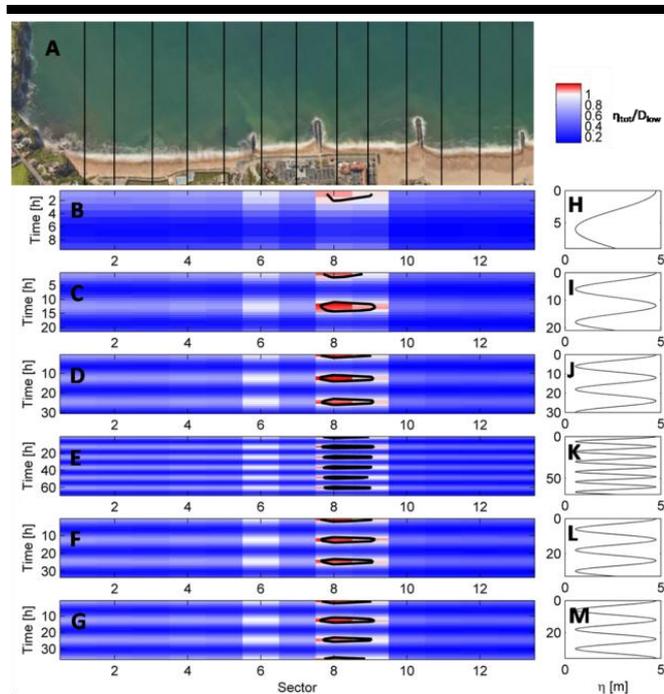


Figure 2. A) Aerial photograph of the study area (google earth). Vertical black lines indicate the studied sectors. B-G) Seawall toe elevation to total water level elevation relation ( $D_{low}/\eta_{tot}$ ) for S1 to S6 respectively. H-M) Tidal elevation for S1 to S6 respectively.

Figure 2 (b-g) represents the ratio between the total water level (tide, surge and wave forcing) and the seawall toe position ( $\eta_{tot} / D_{low}$ ). Blue colour represents swash regime (~beach erosion risk) while red colour represent collision regime (~structure damage risk). Swash regime dominates along the system (97%). However, no matter the storms conditions, the collision regime is always present (3%). Surprisingly, no overwash is recorded in any of the simulated cases. The storm impact along the beach is tide dominated and alongshore non uniform. While southern and northern sectors (1,2,3,4,5,6,10,11 and 12) are entirely dominated by swash regime, the central sectors (8 and 9) are the only ones exposed to collision regimes. It is relevant to mention that, although section 6 is swash dominated, it is at the edge of collision regime.

**Risk indicators**

Risk indicators are classified in two categories: 1) hydrodynamic indicators (mean storm power, cumulative storm power and water level) and 2) morphodynamic indicators (dry beach volume and dry beach width).

An in depth analysis of the results of Figure 2 indicates that the water level acts as a critical filter between swash and collision regimes in the beach of Anglet. The threshold value above which the collision regime is possible to occur is  $\geq 3.5$ m. That is, 0.86 m above the mean water level and 1.2 m below the high water level during spring tide.

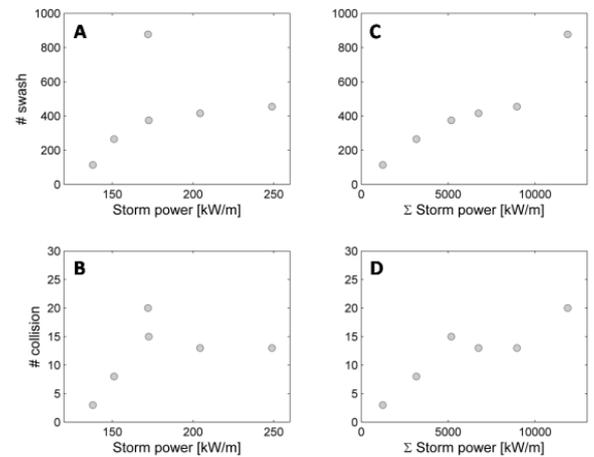


Figure 3. A-B) Storm power and C-D) Cumulative storm power (total storm power) performance as risk indicators.

Figure 3, represents the impact regime (swash, collision) against the storm mean power and against the cumulative or total storm power. No linear relation is found between the number of swash/collision events and storm mean power ( $R = 0.31$  swash regime,  $R = 0.42$  collision regime). This indicates that the mean storm power is not a suitable indicator for the beach of Anglet. However, a better indicator is found if the duration of the storm is taken into account (total storm power). In that case, a linear relation is found between the impact regime and storm total power ( $R = 0.94$  swash regime,  $R = 0.90$  collision regime).

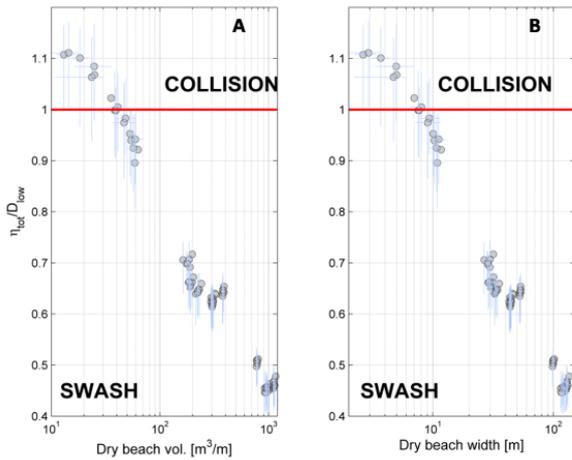


Figure 4. A) Dry beach volume and B) dry beach width performance as a risk indicators.

The role of the dry beach volume and dry beach width as risk indicators is studied in Figure 4. Only cases where collision regime is possible to happen are selected (water level  $\geq 3.5$  m). In this study, the dry beach is represented by the portion of the beach above 4.7 m (corresponding to quantile 0.99 of the measured water level by the tidal gauge). The result is represented by the relation between the total water level and the seawall toe position ( $\eta_{\text{tot}} / D_{\text{low}}$ ) against the dry beach volume/width. A logarithmic relation exist between  $\eta_{\text{tot}} / D_{\text{low}}$  and the dry beach volume/width. While swash regimes are recorded along sectors with large dry beach volume/width, sectors with dry beach volume smaller than  $\sim 54.5$  m<sup>3</sup>/m or dry beach width  $\sim 11$  m are likely to present collision regimes.

## DISCUSSION

The six storm types representative of the extreme wave climate of the Anglet nearshore area, were energetic enough to produced collision regimes along two sectors of the beach (sector 8-9). This finding is consistent with the images collected by a video system located at the southern side of the beach (see Huguet *et al.*, 2016 for video station information). During 2013 and 2014, four type 2 (S2) and 6 (S6) storms coinciding with spring tides were captured by the video system. The impact patterns shown by the video images is consistent with the predicted pattern (Figure 5 a). However, there were particular cases with non-expected regimes along, a priori, safe sectors of the beach (Figure 5 b). The explanation for such behaviour could reside in the hydrodynamic and morphologic variations of the beach. On the one hand, constant storms parameters ( $H_s$ ,  $T_p$  and  $\theta$ ) were imposed along the simulated storms. This situation is hardly seen in nature since storm parameters oscillate throughout the total duration storm. These high (low) energy peaks may lead to specific events with larger (lower) impact. On the other hand, all simulations of the study were based on the averaged 2013 to 2016 post-winter bathymetries. The mean standard deviation of the upper part (surf zone) of the beach during this period was of 2 m (1.25 m), which could be large

enough to modify the hydrodynamic conditions and consequently the expected response of the beach. Previous studies have shown the relevance of the beach elevation or the surf zone morphology on the impact regime. In the study carried out by Castle *et al.* (2015) is shown that along megacusp embayments (erosion points) were coupled to the outer crescentic bar under high energy shore-normal swells. In addition, the beach rotation alters the alongshore distribution of dry beach volume and width (e.g. Harley *et al.*, 2015). This can lead to beach systems with alongshore non uniform distributed vulnerability levels as it is seen in the present study.

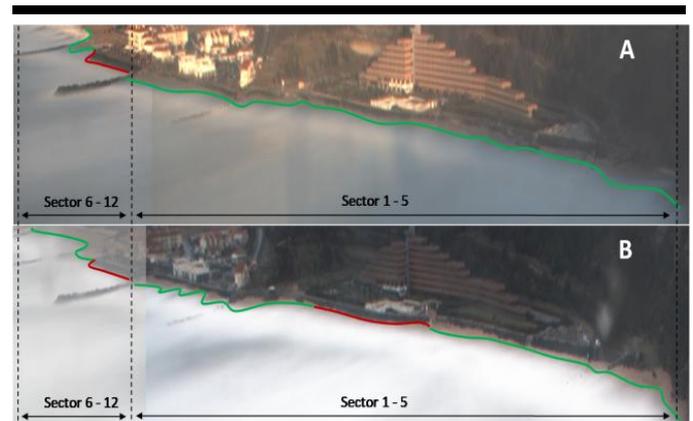


Figure 5. Impact regime along the beach of Anglet Green colour swash regime. Red colour collision regime. A) 2 February 2014, Type 6 storm.  $\eta = 4.6$  m,  $H_s = 5.6$  m,  $T_m = 15$  s. B) 3 March 2014, Type 6 storm,  $\eta = 4.6$  m,  $H_s = 4.6$  m,  $T_m = 15$  s.

The total (cumulative) storm power seems to be a better risk indicator than the averaged storm power. This is explained by the contribution of the storm duration. A large duration implies a greater probability that high tides occur during the storm, as well as, longer time under beach erosive processes. This is consistent with previous studies where it is shown the far greater impact of storm clusters (large duration), where storms occur at close succession with little or no time for beach recovery (Karunaratna *et al.*, 2014) compared to single storms (short duration). Finally, the dry beach volume and width present similar response and seems to perform well as a risk indicators. Indeed, combined with hydrodynamic conditions allow to discriminate the absence/presence of collision impact regime at the beach of Anglet. This has been corroborated by recent studies (Morichon *et al.*, 2018) were the dry beach width prevents the collision or even overwash regimes at engineered beaches. Given that the quantification of the dry beach volume is more complex (usually carried out by topographic surveys) than the dry beach width (easily inferred by means of orthorectified images), it is recommended to use this later indicator to set up a risk alert system.

## CONCLUSIONS

This study is a first step towards the definition of a risk alert system along the Beach of Anglet based on an extreme wave climate analysis and the characterization of site specific risk

indicators. The six site-representative storms have shown to be energetic enough to produce collision regimes along the beach. The current beach design leads to an alongshore non uniform vulnerability due to the location of the seawall that constrains the beach buffer zone. Total storm power combined with water level and dry beach width seems to be the best set of risk indicators for the present study site. Future work needs to be done, especially regarding the influence of intra storm parameters and the variability of beach morphology on the predicted impact regime.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge European POCTEFA Program funding under the research project MAREA EFA 046/15 and the complementary program OCA. We are also thankful to the DIRMSA - DSCM that allowed the installation of the video station on top of the lighthouse of Biarritz.

#### LITERATURE CITED

- Almeida, L., Voudoukas, M., Ferreira Rodrigues, B., and Matias, A. 2012. Thresholds for storm impacts on an exposed sandy coastal area in Southern Portugal. *Geomorphology* 143:144:3–12.
- Armaroli, C., and Duo, E., 2017. Validation of the coastal storm risk assessment framework along the Emilia-Romagna coast. *Coastal Engineering*. ISSN 0378-3839.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A. and Bidlot J.R. 2015. The contributions of short-waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 96 1-15.
- Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.F., Fortunato, A.B., and Karpytchev, M., 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Model* 42, 16–30.
- Carapuço, M.M., Taborda, R., Silveira, T.M., Psuty, N.P., Andrade, C., and Freitas, M.C., 2016. Coastal geoindicators: Towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments, *Earth-Science Reviews*, 154, 183-190.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K.D., Robinet, A., Senechal, N., and Ferreira, S., 2015. Impact of the winter 2013–2014 series of severe eastern Europe storms on a double-barred sandy coast: beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology* 238:135–148.
- Clay, P.M., Colburn, L.L., and Seara, T., 2016. Social bonds and recovery: an analysis of Hurricane Sandy in the first year after landfall. *Marine Policy* 74, 334–340.
- Ferreira O., Plomaritis T. A., and Costas S., 2017. Process-based indicators to assess storm induced coastal hazards, *Earth-Science Reviews*, Volume 173, Pages 159-167, ISSN 0012-8252.
- Harley, M. D., I. L. Turner, and A. D. Short. 2015. New insights into embayed beach rotation: The importance of wave exposure and cross-shore processes, *Journal of Geophysical Research*. *Earth Surface*, 120, 1470–1484.
- Huguet J.R., Castelle B., Marieu V., Morichon D., and de Santiago I., 2016. Shoreline-Sandbar Dynamics at a High-Energy Embayed and Structurally-Engineered Sandy Beach: Anglet, SW France. *Journal of Coastal Research: Special Issue 75 - Proceedings of the 14th International Coastal Symposium*, Sydney, 6-11 March 2016: pp. 393 – 397.
- Karunaratna H., Pender D., Ranasinghe R., Short A.D., and Reeve D.E., 2014. The effects of storm clustering on beach profile variability. *Marine Geology* 348:103–112
- Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J. 1990. "Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis". Wiley, New York.
- Loureiro, C., Ferreira, O., and Cooper, J.A.G., 2012. Extreme erosion on high-energy embayed beaches: influence of megarips and storm grouping. *Geomorphology* 139:155–171
- Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suanes, S., Jackson, D., and Floc'h, F., 2016. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophysical Research Letters*. 43.
- Morichon D., de Santiago I., Delpy M., Callens A., Lique B., and Liria, P., 2016. Assessment of flooding hazards at an engineered beach during extreme events : Biarritz, SW France. *Journal of Coastal Research: Special Issue 85 - Proceedings of the 15th International Coastal Symposium*, Busan, 13-18 May 2018: pp. ? – ?.
- Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., and Nicholls, R.J., 2015. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - a global assessment. *PLoS One* 10, e0118571.
- Nguyen, T.T.X., Bonetti, J., Rogers, K., and Woodroffe, C.D., 2016. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*. 123, 18–43.
- Roelvink D, Reniers A, van Dongeren A, van Thiel de Vries J, McCall R, and Lescinski J. 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*. 56(11):1133–1152.
- Sallenger A.H. Jr., 2000. Storm impact scale for barrier islands. *J Coast Res* 6(3):890–895.
- de Santiago, I., Morichon, D., Abadie, S., Reniers, A. J. H. M., and Liria, P. 2017. A comparative study of models to predict storm impact on beaches. *Natural Hazards*. 87: 843.
- Van Thiel de Vries J.S.M., Van Gent M.R.A., Walstra D.J.R., and Reniers A.J.H.M. 2008. Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments. *Coastal Engineering*. 55(12):1028–1040.
- Voudoukas MI (2016) Developments in large-scale coastal flood hazard mapping. *Natural Hazards Earth System Sciences* 16(8):1841.

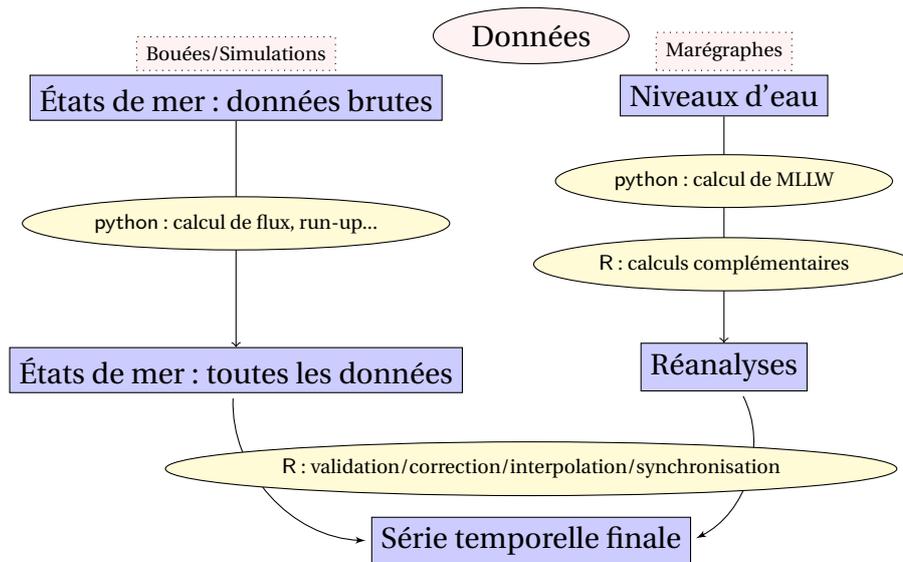


FIGURE A1 – Diagramme résumant la méthode pour produire les jeux de données d'aléa.

## Implémentation

Une grande partie du travail de cette thèse a été de développer des méthodes pour la gestion des données, les calculs de descripteurs physiques (chapitres 2 et 3) et l'implémentation de méthodes statistiques de validation/correction (4) et d'analyse (6).

### Données de variables d'aléa

La figure A1 présente le déroulement de la création d'un jeu de données final à partir de données d'états de mer simulés et observés et de données de niveaux d'eau issues de marégraphes.

Pour les états de mer, les jeux de données disponibles sont d'abord homogénéisés en terme de formats de tableau grâce aux fonctions de lecture/écriture de fichier de python. Un nouveau script python calcule les indicateurs que sont le flux et le run-up pour les données d'états de mer. Les données issues de simulations sont ensuite validées/corrigées par un script R grâce aux données d'observation par bouée.

Pour les niveaux d'eau, les séries temporelles de marégraphes sont réanalysées dans le but d'être complétées selon la méthode décrite lors de la section 3.2.2. Pour cela, un script python calcule les valeurs de MLLW pour la fenêtre temporelle ciblée puis un script R complète les données grâce à la tendance de changement de niveau moyen et la prise en compte de la surcote.

Enfin, la dernière étape consiste en la validation puis éventuelle la correction des données (4) avant synchronisation/interpolation pour former une série temporelle de variables d'aléa complète.

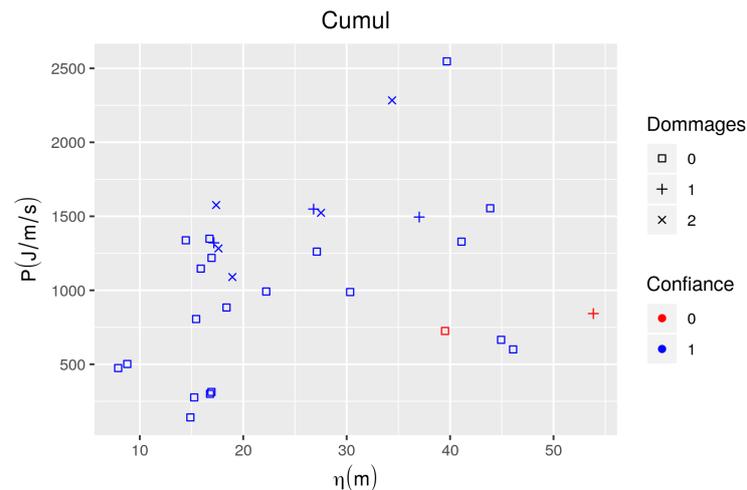


FIGURE A2 – Nuages de points des tempêtes en fonction du niveau d'eau  $\eta$  cumulé et de la valeur cumulée du flux  $P$ . Les sommes cumulées sont calculées sur la durée de chaque évènement. Les  $\square$  (respectivement, les +,  $\times$ ) représentent les tempêtes dont l'indice de dégâts vaut 0 (respectivement, 1, 2). Les points rouges correspondent aux tempêtes pour lesquelles la confiance dans la valeur de l'indice de dégâts est faible.

Nous pouvons noter que les résultats issus de la recherche historique du chapitre 5 sont principalement issus de lecture de dossiers et sont de nature qualitative et n'ont donc pas nécessité de travail de développement et sont juste stockés sous forme d'un tableau de 30 lignes avec les indices de dégâts, submersion et confiance et les dates de début et fin pour chaque évènement.

## Analyse

Dans le chapitre 6, le travail d'implémentation et de vérification pour réaliser l'analyse des données a représenté la majeure partie du temps. Les scripts R sont disponibles sur demande. Les résultats obtenus dans la section 6.1 proviennent d'outils graphiques du package `ggplot2` de R et de l'implémentation de méthodes de simples de sélection de sous-tableaux. Enfin, les résultats 6.2 ont été obtenus grâce au package `extRemes`.

## Règles sur les sommes cumulées

La figure A2 est un exemple de nuage de points (où chaque point représente un évènement répertorié par la recherche historique) des sommes cumulées de deux variables (le flux  $P$  et le niveau d'eau  $\eta$  dans l'exemple) sur la durée totale d'un évènement. Ce nuage de points ne permet pas de distinguer les évènements ayant engendré des dégâts des autres évènements, l'utilisation des sommes cumulées de variables ne donne aucun bon résultat.



# Références

- [1] Roland A., Cucco A., Ferrarin C., Hsu T.-W., Liau J.-M., Ou S.-H., Umgiesser G., and Zanke U. On the development and verification of 2-d coupled wave-current model on unstructured meshes. *J. Mar. Syst.*, 78 :S244–S254, 2009.
- [2] Sibley A., Cox D., and Titley H. Coastal flooding in england and wales from atlantic and north sea storms during the 2013/2014 winter. *Weather*, 70(2) :62–70, 2015.
- [3] Castelle B., Marieu V., Bujan S., Splinter K., Robinet A., Sénéchal N., and Ferreira S. Impact of the winter 2013–2014 series of severe western europe storms on a double-barred sandy coast : Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238 :135–148, 2015.
- [4] Gouldby B., Méndez F, Guancho Y., Rueda A., and Mínguez R. A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis. *Coastal Engineering*, 88 :15–26, 2014.
- [5] Loubrieu B., Bourillet J.F, and Moussat E. Bathy-morphologie régional du golfe de gascogne et de la manche, modèle numérique, 2008 brest : Ifremer. *Tech. Rep.*, 2008.
- [6] Merz B., Kreibich H., Thielen A., and Schmidtke R. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1) :153–163, 2004.
- [7] Merz B., Kreibich H., Schwarze R., and Thielen A. Review article" assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8) :1697–1724, 2010.
- [8] André C., Monfort D., Bouzit M., and Vinchon C. Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings : insights gained from johanna (2008) and xynthia (2010) storm events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(8) :2003–2012, 2013.
- [9] Gerrard C. and Petley D. A risk society? environmental hazards, risk and resilience in the later middle ages in europe. *Natural Hazards*, 69(1) :1051–1079, 2013.
- [10] Lafon C. Intempéries : le bilan d'un hiver infernal dans le sud-ouest. *Sud-Ouest*.

- [11] Maisondieu C., Accensi M., Le Roux J-F, and Boudière E. *Manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE. Mise à jour 2017 du jeu de données de hindcast*, 2017.
- [12] Mallet C., Garnier C., Maugard F, Millescamps B., Mugica J., Nahon A., Rosebery D., avec la collaboration de Bassibey A., Bouchet C., Capdeville B., Chartier E., Devoti J., Duport B., Maia J., Perrocheau E., Rambaud D., Raynaud V., and Robert D. *Compte-rendu des observations post-tempêtes sur le littoral aquitain (décembre 2013 –janvier 2014)*. Technical report, 2014. Rapport final.
- [13] Small C. and Nicholls R. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, pages 584–599, 2003.
- [14] Cerema. *Fiches synthétiques de mesure des états de mer du réseau CANDHIS*, 2018.
- [15] Chanu D. *Étude vidéo de la submersion d'une plage en fond de baie*. Master's thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2019. Rapport de stage de Ingénieur ISA-BTP.
- [16] Consuegra D., Joerin F, and Vitalini F. Flood delineation and impact assessment in agricultural land using gis technology. In *Geographical information systems in assessing natural hazards*, pages 177–198. Springer, 1995.
- [17] Didier D., Baudry J., Bernatchez P, Dumont D., Sadegh M., Bismuth E., Bandet M., Dugas S., and Sévigny C. Multihazard simulation for coastal flood mapping : Bathhtub versus numerical modelling in an open estuary, eastern canada. *Journal of Flood Risk Management*, page e12505, 2018.
- [18] Dutta D., Herath S., and Musiak K. A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of hydrology*, 277(1-2) :24–49, 2003.
- [19] Roelvink D., Reniers A., Van Dongeren AP, de Vries J., McCall R., and Lescinski J. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11-12) :1133–1152, 2009.
- [20] Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM). Les archives historiques et géologiques au service de la connaissance des risques côtiers. <http://www.risques-cotiers.fr/fr/boite-a-outils/suivi-historique>, 2012.
- [21] Gilleland E. and Katz R. extremes 2.0 : An extreme value analysis package in r. *Journal of Statistical Software, Articles*, 72(8) :1–39, 2016.
- [22] Kalnay E., Kanamitsu M., Cistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K., Ropelewski C., Wang J., Leetma A., Reynolds R., Jenne R., and Joseph D. The ncep/ ncar reanalysis project. *Bul. of the American Met. Soc.*, 77 :437—471, 1996.

- [23] McBean E., Gorrie J., Fortin M., Ding J., and Monlton R. Adjustment factors for flood damage curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(6) :635–646, 1988.
- [24] Penning-Rowsell E. *Flood hazard assessment, modelling and management : Results from the EUROflood project*. 1995.
- [25] Penning-Rowsell E., Johnson C., Tunstall S., Tapsell S., Morris J., Chatterton J., and Green C. The benefits of flood and coastal risk management : a manual of assessment techniques (the multi-coloured manual). *Flood Hazard Research Centre, Middlesex University*, 2005.
- [26] Saha S. et al. The ncep climate forecast system reanalysis. *Bul. Amer. Meteor. Soc.*, 91 :1015–1057, 2010.
- [27] Elmer F., Thielen A., Pech I., and Kreibich H. Influence of flood frequency on residential building losses. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(10) :2145–2159, 2010.
- [28] Kato F. and Torii K. Damages to general properties due to a storm surge in japan. *Solutions to Coastal Disasters'02*, pages 159–171, 2002.
- [29] Dodet G., Castelle B., Masselink G., Scott T., Davidson M., Floc'h F., Jackson D., and Suanez S. Beach recovery from extreme storm activity during the 2013–14 winter along the atlantic coast of europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1) :393–401, 2019.
- [30] Masselink G., Castelle B., Scott T., Dodet G., Suanez S., Jackson D., and Floc'h F. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the atlantic coast of europe. *Geophysical Research Letters*, 43(5) :2135–2143, 2016.
- [31] Salvadori G., De Michele C., and Durante F. On the return period and design in a multivariate framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11) :3293–3305, 2011.
- [32] Saporta G. *Probabilités, Analyse de Données et Statistique*. Editions Technip, Paris, 1990.
- [33] Whitham G. A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a lagrangian. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2) :273–283, 1965.
- [34] Airy G.B. Tides and waves. *Encyclopaedia Metropolitana*, 1845.
- [35] Munk W. H. Origin and generation of waves. *Proceedings 1st International Conference on Coastal Engineering, Long Beach, California : ASCE*, pages 1–4, 1950.
- [36] Stockdon H., Thompson D., Plant N., and Long J. Evaluation of wave run-up predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, 92 :1–11, 2014.

- [37] Stockdon H., Holman R., Howd P., and Sallenger A. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7) :573–588, 2006.
- [38] Church J., Godfrey J., Jackett D., and McDougall T. A model of sea level rise caused by ocean thermal expansion. *Journal of Climate*, 4(4) :438–456, 1991.
- [39] Torterotot J-P, Kauark-Leite L-A., and Roche P-A. Analysis of individual real-time responses to flooding and influence on damage to households. In *Floods and flood management*, pages 363–387. Springer, 1992.
- [40] Zaninetti J.M. L'urbanisation du littoral en france. *Population et Avenir*, 677 :4–8, 2006.
- [41] Breiman L., Friedman J. H., Olshen R. A., and C. J. Stone. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, 1984.
- [42] Kaufman L. and Rousseeuw PJ. *Finding Groups in Data : An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley, 1990.
- [43] Sylvestre Leroy, Rodrigo Pedreros, Camille André, François Paris, Sophie Lecauchoux, Fabien Marche, and Charlotte Vinchon. Coastal flooding of urban areas by overtopping : dynamic modelling application to the johanna storm (2008) in gâvres (france). *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(11) :2497–2510, 2015.
- [44] Beauvivre M. 50 ans de tempêtes sur le littoral basque. Master's thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2016. (Rapport de stage de Master 2 Géographie – Aménagement – Sociologie Spécialité « Développement durable, Aménagement, Société, Territoire » (DAST)).
- [45] Hofert M., Kojadinovic I., Machler M., and Yan J. *Elements of copula modeling with R*. Berlin, Germany : Springer International Publishing AG., 2018.
- [46] Hollander M., Wolfe D. A, and Chicken E. *Nonparametric statistical methods*, volume 751. John Wiley & Sons, 2013.
- [47] NOAA. *Tidal Datums and their applications*, 2000.
- [48] Hawkes P. Joint probability analysis for estimation of extremes. *Journal of Hydraulic Research*, 46(S2) :246–256, 2008.
- [49] Lazure P. and Dumas F. An external-internal mode coupling for a 3d hydrodynamical model for applications at regional scale (mars). *Advances In Water Resources*, 31 :233–250, 2008.
- [50] Ruggiero P, Komar P. D., , McDougal W. G., Marra J. J., and Beach R. A. Wave runup, extreme water levels and the erosion of proper-ties backing beaches. *Journal Coastal Research*, 17 :407–419, 2001.

- [51] Serge Planton, Gonéri Le Cozannet, Anny Cazenave, Stéphane Costa, Olivier Douez, Pierre Gaufrès, François Hissel, Déborah Idier, Vannessa Laborie, Vincent Petit, et al. Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle. vol 5 : Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. 2015.
- [52] Nicholls R., Hoozemans F., and Marchand M. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise : regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 9 :S69–S87, 1999.
- [53] Dean R.G and Dalrymple R.A. *Water Wave mechanics for engineers and scientists*, volume 2. World Scientific Publishing Company, 1977.
- [54] Abadie S. *Catalogue des Tempêtes sur la Côte Basque de 1950 à 2014*, 2017.
- [55] Coles S. *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London, United Kingdom : Springer-Verlag, 2001.
- [56] Cox S. pytides. <https://github.com/sam-cox/pytides>, 2013.
- [57] Jebson S. Fact sheet number 6 : The beaufort scale. Technical report, 2007.
- [58] Longuet-Higgins M. S. Mass transport in water waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 245 :535–581, 1953.
- [59] Longuet-Higgins M. S. and Stewart R. W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4) :481–504, 1962.
- [60] Longuet-Higgins M. S. and Stewart R. W. A note on wave set-up. *Journal of Marine Research*, 21 :4–10, 1963.
- [61] Vallet S. Insuring the uninsurable : The French natural catastrophe insurance system. *Catastrophe Risk and Reinsurance, London : Risk Books, Haymarket House*, pages 199–216, 2004.
- [62] Nadia Senechal, Stéphane Abadie, Edith Gallagher, Jamie MacMahan, Gerd Masselink, Hervé Michallet, Ad Reniers, Gerben Ruessink, Paul Russell, Damien Sous, et al. The ecors-truc vert’08 nearshore field experiment : presentation of a three-dimensional morphologic system in a macro-tidal environment during consecutive extreme storm conditions. *Ocean Dynamics*, 61(12) :2073–2098, 2011.
- [63] Bulteau T., Delvallée E., Thiebot J., and Pedreros R. Retour d’expérience sur l’utilisation des probabilités conjointes pour la caractérisation de niveaux marins à la côte. In *XII<sup>e</sup> Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, pages 10–p. Paralia, 2012.
- [64] Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., and White L.L. *IPCC 2014 : Climate Change*

---

*2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2014.

- [65] Yan W., Hunt L., Sheng Q., and Szlavniec Z. R : Development core team (2005) : R : a language and environment interaction for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, www. R-project. org*, 2000.
- [66] Bertin X., Li K., Roland A., and Bidlot J-R. The contribution of short-waves in storm surges : Two case studies in the bay of biscay. *Continental Shelf Research*, 96 :1–15, 2015.
- [67] Zhang Y. and Baptista A. Selfe : a semi-implicit eulerian–lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean modelling*, 21(3-4) :71–96, 2008.